تطوّر علم الطبيعة

تحول الآراء من المبادىء الأولى إلى نظرية النسبية والكمات

تأليف

ألبرت أينشتين

و

ليوبولد إنفلد

ترجمة

الدكتور محمد عبد المقصود النادى
المدرس بكلية العلوم بجامعة القاهرة

الدكتور عطية عبد السلام عاشور
المدرس بكلية العلوم بجامعة القاهرة

مراجعة

الدكتور محمد مرسى أحمد
الأستاذ بكلية العلوم بجامعة القاهرة



ملتزم الطبع والنشر
مكتبة الأنجلو المصرية
١٦٥ شارع محمد بك فريد (عماد الدين سابقا)

تطور علم الطبيعة

تحول الآراء من المبادىء الأولى إلى نظرية النسبية والكمات

تأليف

ألبرت أينشتين

و

ليوبولد إنفلد

ترجمة

الدكتور محمد عبد المقصود النادى
المدرس بكلية العلوم بجامعة القاهرة

الدكتور عطية عبد السلام عاشور
المدرس بكلية العلوم بجامعة القاهرة

مراجعة

الدكتور محمد مرسى أحمد
الأستاذ بكلية العلوم بجامعة القاهرة



ملتزم الطبع والنشر
مكتبة الأنجلو المصرية
١٦٥ شارع محمد بك فريد (عماد الدين سابقا)

مقدمة

من حق القارئ قبل أن يشرع فى قراءة الكتاب أن يتوقع الإجابة على بعض الأسئلة البسيطة كأن يعرف مثلاً الغرض من وضع هذا الكتاب والمستوى المطلوب فى القارئ كى يتمكن من فهمه .

من العسير أن نبدأ بالإجابة على هذين السؤالين بطريقة واضحة مقنعة ، ولعله قد يكون من الأيسر أن نجيب عليها فى نهاية الكتاب ، على الرغم من أن ذلك يكون غير ذى قيمة عندئذ . ولعلنا نجد من الملائم بيان الأمور التى نهدف إليها بوضع هذا الكتاب . فنحن لم نقصد وضع كتاب فى علم الطبيعة ، ولن يجد القارئ هنا دراسة منظمة للحقائق والنظريات الأولية لهذا العلم . وكان غرضنا الأساسى أن نضع الخطوط الرئيسية لمحاولات العقل البشرى إيجاد الارتباط بين عالم الأفكار وعالم الظواهر . وقد حاولنا أن نبين القوى الفعالة التى تدفع العلم إلى ابتكار الأفكار التى تناظر حقائق عالمنا . ولكن كان من الواجب أن تكون دراستنا بسيطة وكان علينا أن نشق لأنفسنا خلال الحشد الكبير من الحقائق والآراء الطريق الذى يبدو لنا أكثر أهمية وذا معنى واضح . وقد اضطررنا إلى إهمال الحقائق والنظريات التى لا تقع فى هذا الطريق . وكان حتما علينا لتحقيق هدفنا العام أن نحدد اختيار الحقائق والآراء التى سندرسها . ويجب ألا يؤثر عدد الصفحات المخصصة لدراسة موضوع ما فى الحكم على أهمية هذا الموضوع . وقد تركنا جانباً بعض اتجاهات الفكر الأساسية ولم يكن تركنا لها ناتجاً عن عدم أهميتها ، بل لأنها لا تقع فى الطريق الذى اخترناه .

وقد تناقشنا طويلا حين شرعنا فى وضع هذا الكتاب فى المميزات التى يجب أن تتوفر فى قارئنا المثالى وشغلنا كثيراً بهذا الموضوع . وقد تخيلنا أن القارئ

سيستعيض عن عدم درايته التامة بعلمى الطبيعة والرياضة ، بالتحلى بكثير من الخصائل الحيدة . فمثلا تخيلناه مهتما بالآراء الطبيعة والفلسفية ، وكان علينا أن نعجب بصبره الذى استعان به فى تتبع الفقرات المملة والصعبة . وتخيلنا هـذا القارئ يقنعنا بأنه لـكى يفهم أية صفحة يجب عليه أن يقرأ الصفحات السابقة بعناية ، فهو يعلم أن من الخطأ أن يقرأ الـكتاب العلمى حتى ولو كان مبسطاً بنفس الطريقة التى تقرأ بها القصص .

هذا الـكتاب هو محادثة بسيطة بين القارئ وبيننا وقد يجد القارئ هـذا الـكتاب منفراً أو محبباً إلى النفس ، مملا أو مثيراً للاهتمام ولـكن هدفنا يتحقق إذا نجحت هذه الصفحات فى إعطاء القارئ فـكرة ما عن الجهاد الشاق للعقـل البشرى المبتـكر فى سبيل فهم شامل للقوانين التى تتحكم فى الظواهر الطبيعة .

ألبرت أينشتين

ليوبولد إنفلد

فهرس الكتاب

صفحة

الباب الأول

نشأة وجهة النظر الميكانيكية

القصة الغامضة الكبرى ١

الدليل الأول ٣

الكميات المتجهة ٨

لغز الحركة ١٣

يبقى دليل آخر ٢٣

نظرية السيال للحرارة ٢٦

عربة الملاهي ٣٣

نظام التحويل ٣٦

الأساس الفلسفي ٣٩

نظرية الحركة للمادة ٤٢

الباب الثاني

تداعي وجهة النظر الميكانيكية

المائعان الكهربائيان ٤٩

المائعان المغناطيسيان ٥٨

الصعوبة الجدية الأولى ٦١

سرعة الضوء ٦٦

النظرية الجسيمية للضوء ٦٨

لغز اللون ٧٠

ما هي الموجة ؟ ٧٤

صفحة

النظرية الموجية للضـوء ٧٧
هل موجات الضوء طولية أم مستعرضة ؟ ٨٤
الأثير ووجهة النظر الميكانيكية ٨٦
تلخيص ٨٨

الباب الثالث

المجال — النسبية

المجال كوسيلة لتمثيل الواقع ٨٩
دعامتا نظرية المجال ٩٨
واقعية المجـال ١٠١
المجال والأثير ١٠٧
السقالة الميكانيكيـة ١٠٩
الأثير والحركة ١١٨
الزمن والمسافة والنسبية ١٢٩
نظرية النسبية والميكانيكا ١٤١
متصـل الزمان والمـكان ١٤٦
النسبية العامة ١٥٤
خارج وداخل المصعد ١٥٩
الهندسة والتجربة ١٦٥
النسبية العامـة وتحقيقها ١٧٥
المجال والمادة ١٨٠
تلخيص ١٨٢

الباب الرابع

الـكمات

الاتصال وعـدم الاتصال ١٨٤
الـكمات الأولية للمادة والـكهرباء ١٨٦

صفحة

كمات الضوء ١٩٠

الطيف الضـوئى ١٩٦

أمواج المادة ٢٠١

أمواج الاحتمال ٢٠٦

علم الطبيعة وحقيقة الوجود ٢١٧

الخلاصة ٢٢٠

قائمة باللوحات

اللوحة الأولى : حركة براون ... ... تقابل صفحة ٤٦

اللوحة الثانية : حيود الضوء ... ... « « ٨٣

اللوحة الثالثة : خطوط الطيف — حيود الأشعة السينية والأمواج
الـكهربائية ... ... « « ٢٠٠

الباب الأول

نشأة وجهة النظر الميكانيكية

[القصة الغامضة الكبرى — الدليل الأول — الكميات المتجهة — لغز الحركة — يبقى دليل آخر — نظرية السيال للحرارة — عربة الملاهى — نظام التحويل — الأساس الفلسفى — نظرية الحركة للمادة] .

القصة الغامضة الكبرى :

توجد الألغاز البوليسية الكاملة فى الخيال . وتحتوى مثل هذه الألغاز على جميع الأدلة الضرورية التى تجعلنا نكون نظريتنا الخاصة للحالة . وإذا تتبعنا سلسلة حوادث القصة بدقة فإننا نصل إلى حلها الكامل مباشرة قبل كشف المؤلف عنه فى نهاية الكتاب . والحل فى ذاته ، على عكس الحالة فى الألغاز البسيطة ، لا يخيب أملنا ويظهر فى الوقت المناسب الذى نتوقعه فيه .

هل يمكن تشبيه قارىء مثل هذا الكتاب بالعلماء ، الذين استمروا خلال الأجيال المتعاقبة يبحثون عن حل لأسرار الطبيعة ؟ ورغم عدم وجود وجه لهذه المقارنة ، الشىء الذى سيضطرنا إلى تركها فيما بعد ، فإنه يوجد لها بعض الدوافع التى يمكن تعميمها وتعديلها لتسهيل مهمة العلم فى حل أسرار الكون .

ولا تزال هذه القصة الغامضة الكبرى دون حل . بل إنه لا يمكن الجزم بوجود حل نهائى لها . لقد حصلنا على الكثير نتيجة لقراءة هذه القصة ، فقد علمتنا مبادىء لغة الطبيعة ، ومكنتنا من فهم كثير من الأدلة وكانت مصدراً للسرور وإثارة الاهتمام بخفف التعب والإرهاق اللذين غالباً ما يصاحبا تقدم العلم . ولكننا نعلم جيداً أنه بالرغم من كثرة الأجزاء التى قرئت وفهمت ، فإننا لا نزال بعيدين عن الحل الكامل إذا وجد ، وهو شىء بعيد الاحتمال . وفى كل مرحلة

نحاول أن نجد تفسيراً يتفق مع الأدلة المكتشفة حتى ذلك الوقت . ولقد فسرت النظريات المبنية على التجربة كثيراً من الحقائق ولكن لم يكتشف إلى الآن حل عام يتفق مع جميع الأدلة المعروفة ، وفى كثير من الأحيان بعد الاستزادة من القراءة يتضح فشل نظرية كان يظن أنها كاملة كافية ، وذلك لظهور حقائق جديدة تناقض النظرية أو يتعذر تفسيرها بها . وكلما تمادينا فى القراءة كلما زاد تقديرنا لكمال تصميم الكتاب رغم أن الحل الكامل يبدو كأنه يبتعد كلما تقدمنا .

وفى جميع القصص البوليسية تقريباً ، منذ قصص كونان دويل الرائعة ، يأتى وقت يكون الباحث قد جمع جميع الحقائق اللازمة لمرحلة واحدة على الأقل من مراحل المسألة التى يبحثها . وفى أغلب الأحيان تبدو هذه الحقائق غريبة متفرقة لا علاقة بينها بالمرة . ولكن الباحث البوليسى الخبير يعلم أنه لا يحتاج الآن إلى بحث جديد وأن التفكير البحت يقوده إلى ربط الحقائق التى جمعها ببعضها . وبغتة ، وربما أثناء عزفه على الكمان أو تدخينه لغليونه وهو جالس فى مقعد مريح تحدث المعجزة ! فبالاضافة إلى حصوله على تفسير للأدلة الموجودة يعلم أن أموراً معينة لابد وأن تكون قد حدثت . ويستطيع الآن أن يخرج ويجمع أدلة جديدة تقوى نظريته ، وذلك لأنه يعلم الآن أين يبحث عنها .

ويجب على العالم الذى يقرأ أسرار الكون ، إذا سمح لنا أن نعيد استعمال هذه العبارة البالية ، أن يجد الحل لنفسه ، وذلك لأن من المستعذر عليه أن يدير الصفحات الأخيرة للكتاب ويقرأها كما اعتاد أن يفعل قراء القصص الأخرى الذين لا صبر لهم . وفى الحالة الراهنة القارىء هو نفسه الباحث الذى يحاول أن يفسر ولو لدرجة محدودة العلاقة بين الحوادث وما تدل عليه . ولكى يحصل العالم حتى على حل غير كامل ، يجب عليه أن يجمع الحقائق غير المرتبة التى أمكنه الحصول عليها وينظمها ويجعلها مفهومة وذلك باستعمال التفكير المبدع .

وهدفنا من الصفحات القادمة ، هو وصف عام لعمل علماء الطبيعة ، ذلك العمل الذى يناظر التفكير البحت للباحث البوليسى ، وسنوجه أكثر اهتمامنا

إلى الدور الذى تلعبه الأفكار فى البحث عن أسرار الطبيعة ذلك البحث المملوء بالمغامرات .

الدليل الأول :

منذ بدأ التفكير الإنسانى ومحاولات قراءة القصة الغامضة الكبرى مستمرة . ولكن العلماء لم يبدأوا فى فهم لغة هذه القصة إلا منذ زمن يزيد قليلاً عن ثلاثمائة عام . ومنذ ذلك الوقت ، عصر جاليليو ونيوتن ، أخذ العلماء يسرعون فى القراءة . فتكونت وسائل البحث الدقيقة ، وطرق الحصول على الأدلة واقتفاء أثرها . ورغم حل بعض الألغاز الطبيعية فقد ظهر بعد الاستزادة من البحث أن كثيراً من الحلول سطحى ولا يسرى فى جميع الأحوال .

والحركة مسألة أساسية وفى غاية الأهمية . وقد ظلت هذه المسألة غامضة آلافا من السنين وذلك لشدة تعقدها . وجميع الحركات التى نشاهدها فى الطبيعة مثل حركة حجر قذف فى الهواء ، أو حركة سفينة تسير فى البحر ، أو حركة عربة تدفع فى الطريق ، هى فى الحقيقة مرتبطة ببعضها أشد الارتباط . ولفهم هذه الظواهر ، يحسن أن نبدأ بأبسط الحالات الممكنة ثم نأخذ فى دراسة الحالات الأكثر تعقيداً تدريجياً . اعتبر جسماً ساكناً بحيث لا توجد حركة على الاطلاق . لتغيير موضع جسم كهذا يلزم التأثير عليه بطريقة ما ، كدفعه أو رفعه ، أو جعل أجسام أخرى مثل الجياد أو المحركات البخارية تحركه . ويدلنا الإلهام أن الحركة ترتبط بالدفع أو الرفع أو الشد . وكثرة التجربة تدفعنا إلى أن نخاطر ونقول أنه يجب أن يكون الدفع أشد لكى تكون حركة الجسم أسرع . ويكون من الطبيعى أن نستنتج أنه كلما كان التأثير على الجسم أقوى كلما كانت سرعته أكبر فالعربة ذات الجياد الأربعة تتحرك أسرع من العربة ذات الجوادين فقط . وندرك بالبديهة ضرورة ارتباط السرعة بالتأثير .

من الحقائق التى يعرفها قراء القصص البوليسية الخيالية أن الدليل الكاذب يعقد القصة ويؤخر الوصول إلى الحل . وقد كانت طريقة التفكير التى أملاها الإلهام

خاطئة وأدت إلى أفكار غير صحيحة عن الحركة ، وقد ظلت هذه الأفكار سائدة قروناً كثيرة . وربما كانت مكانة أرسطاليس العظيمة في جميع أنحاء أوروبا هي السبب الرئيسي في استمرار الاعتقاد في هذه الفكرة البديهية زمناً طويلاً . نقتبس من كتاب « الميكانيكا » المنسوب إليه منذ ألفي عام :

« يسكن الجسم المتحرك إذا توقفت القوة التي تحركه عن التأثير » .

لقد كان اكتشاف جاليليو لطرق التفكير العلمي وتطبيقاته من أهم ما توصلنا إليه في تاريخ التفكير الإنساني ، ولم يبدأ علم الطبيعة حقيقة إلا منذ ذلك الوقت . فقد علمنا هذا الاكتشاف ألا نثق دائماً بالاستنتاجات البديهية المبنية على الملاحظات السريعة ، وذلك لأنها تقود في بعض الأحيان إلى أدلة خاطئة .

ولكن أين يخطيء الإلهام ؟ هل يكون من الخطأ أن نقول أن العربة التي تجرها أربعة جياد تتحرك أسرع من تلك التي يجرها جوادان فقط ؟

دعنا نختبر الخواص الأساسية للحركة بدقة ، ولنبدأ بالتجارب اليومية البسيطة التي اعتادها الإنسان منذ بدء الحضارة واكتسبها في صراعه للبقاء .

نفرض أن شخصاً يدفع عربة في طريق أفقي . إذا توقف هذا الشخص عن الدفع فجأة فإن العربة تستمر في الحركة مسافة قصيرة قبل أن تسكن ، ونتساءل الآن : كيف يمكن زيادة هذه المسافة ؟ توجد طرق مختلفة مثل تشحيم العجلات وجعل الطريق أملس للغاية . فكلما دارت العجلات بسهولة وكلما كان الطريق أملس ، كلما استمرت العربة في الحركة مدة أطول . ما هو التغيير الذي حدث نتيجة لتشحيم العجلات وجعل الطريق أملس للغاية ؟ فقط الإقلال من تأثير العقبات الخارجية . فقد تناقص فعل ما يسمى بالاحتكاك في كل من العجلات وبين العجلات والطريق . وهذا في حد ذاته تفسير نظري لحقيقة مشاهدة ، وهو في الحقيقة تفسير اختياري . يجب أن نخطو خطوة أخرى هامة إلى الأمام لنحصل على الدليل الصحيح . تخيل طريقاً لا خشونة فيه (أملس ١٠٠ ٪) وعجلات لا احتكاك فيها على الإطلاق . بذلك لا يوجد ما يوقف العربة وعلى ذلك تستمر

فى الحركة إلى الأبد . لا نصل إلى هـذه النتيجة إلا بالتفـكير فى تجربة مثالية يستحيل إجراؤها فعلاً ، وذلك لاستحالة التخلص من المؤثرات الخارجية . وهذه التجربة المثالية تبين الدليل الذى هو فى الواقع حجر الأساس فى ميكانيكا الحركة .

بمقارنة طريقتى التفـكير فى المسألة يمكننا أن نقول : الفـكرة الالهامية هى : بازدياد التأثير تزداد السرعة . وعلى ذلك تبين السرعة ما إذا كانت هناك قوى خارجية تؤثر على الجسم . الدليـل الجديد الذى وجده جاليليو هو : إذا لم يدفع الجسم أو يجر أو يؤثر عليه بأية طريقة أخرى ، أو بالاختصار إذا لم تؤثر قوى خارجية على الجسم فإنه يتحرك بانتظام أى بسرعة ثابتة فى خط مستقيم . أى أن السرعة لا تبين ما إذا كان الجسم مؤثراً عليه بقوى خارجية أم لا ؟ وقد صاغ نيوتن نتيجة جاليليو ، وهى النتيجة الصحيحة على هيئة قانون القصور الذاتى بعد ذلك بمدة طويلة . وأول شىء فى علم الطبيعة يحفظ عن ظهر قلب فى المدارس هو هذا القانون ، وبعضنا يتذكره فى الصورة الآتية :

« يحتفظ كل جسم ساكن ، أو متحرك حركة منتظمة فى خط مستقيم ، بحالته إلا إذا اضطر إلى تغييرها نتيجة لتأثير قوى عليه » .

لقد رأينا أنه لا يمكن الوصول إلى قانون القصور الذاتى هـذا مباشرة من التجارب العملية ، وإنما نصل إليه عن طريق التفـكير المتفق مع المشاهدة ، ورغم استحالة إجراء التجربة المثالية فعلاً ، فإنها تؤدى إلى فهم شامل لتجارب حقيقية .

من بين الحركات المعقدة المختلفة الموجودة حولنا فى الحياة ، سنختار الحركة المنتظمة كمثال أول وهى أبسط الحالات لعدم وجود قوى خارجية مؤثرة . نلاحظ أنه لا يمكن تحقيق الحركة المنتظمة عمليا ، فالحجر الساقط من برج ، أو العربة المدفوعة فى الطريق لا يمكن جعلها تتحرك حركة منتظمة تماماً ، وذلك لاستحالة التخلص من القوى الخارجية .

فى القصص البوليسية الجيدة ، تقودنا الأدلة الواضحة فى أكثر الأحيان إلى الاتهام الخاطىء . بالمثل فى محاولتنا فهم قوانين الكون نجد أن التفسيرات

البسيطة المبنية على الإلهام تكون فى أغلب الأحيان خاطئة .

إن التفكير الإنسانى ليخلق صورة دائمة التغير للكون ، والذى أضافه جاليليو هو تخلصه من وجهة النظر المبنية على الالهام واستبدالها بأخرى جديدة . وهذا هو مغزى اكتشاف جاليليو .

ويظهر على الفور سؤال آخر يتعلق بالحركة . ما دامت السرعة ليست دليلاً على القوى الخارجية المؤثرة على الجسم فما هو هذا الدليل ؟ لقد وجد جاليليو جواب هذا السؤال كما وجده نيوتن فى صورة أكثر اختصاراً ، وهذه الاجابة دليل جديد فى بحثنا .

للحصول على الجواب الصحيح ، يجب أن نمعن التفكير فى مسألة العربة التى تتحرك على طريق أملس . فى هذه التجربة المثالية كان انتظام الحركة نتيجة لعدم وجود أى قوى خارجية . نفرض أن العربة التى تتحرك بانتظام دفعت فى اتجاه حركتها . ماذا يحدث الآن ؟ واضح أن سرعتها تزداد . كذلك من الواضح أنها إذا دفعت فى عكس اتجاه حركتها فإن سرعتها تتناقص . فى الحالة الأولى تتغير السرعة وتزداد نتيجة للدفع ، وفى الحالة الثانية تتغير السرعة وتتناقص نتيجة له . وتلى النتيجة الآتية على الفور : القوى الخارجية تغير السرعة . إذن لا تكون السرعة نفسها نتيجة للدفع ، وإنما يكون تغيرها هو النتيجة ، وأية قوة إما أن تزيد أو تنقص السرعة على حسب ما إذا كانت فى اتجاه الحركة أم فى عكسه . لقد رأى جاليليو ذلك بوضوح وكتب فى مؤلفة « علمان جديدان » :

« إذا اكتسب جسم سرعة معينة فإنه يبقى محتفظاً بها ما دامت المؤثرات الخارجية التى تعمل على تغييرها بالزيادة أو النقصان غير موجودة ، وهو شرط لا يمكن توفره إلا على المستويات الأفقية وذلك لأنه يوجد فعلا سبب لازدياد السرعة فى حالة المستويات التى تميل إلى أسفل ، كما يوجد سبب لتناقصها فى حالة المستويات التى تميل إلى أعلى ، وعلى ذلك ينتج أن الحركة على المستوى الأفقى تكون مستمرة وذلك لأنه إذا كانت السرعة منتظمة فلا يمكن إنقاصها أو من باب أولى ملاشاتها » .

إذا تتبعنا الدليل الصحيح فإننا نفهم مسألة الحركة بوضوح . وأساس الميكانيكا الكلاسيكية (القديمة) كما وضعها نيوتن هو العلاقة بين القوة والتغير فى السرعة لا السرعة نفسها كما يبدو لنا بالبديهة .

لقد تكلمنا عن فكرتين تلعبان دورين هامين فى الميكانيكا الكلاسيكية : القوة والتغير فى السرعة . ولقد عممت كلا من هاتين الفكرتين أثناء تطور العلم . لذلك تلزم دراستهما بدقة .

ما هى القوة ؟ نعرف بالبديهة ماذا نعنى بهذا اللفظ . لقد نشأت فكرة القوة عن الجهد المبذول فى الدفع أو القذف أو الجر — من الإحساس العضلى الذى يصاحب كلا من هذه الأعمال . ولكن تعميم فكرة القوة يذهب إلى أبعد من هذه الأمثلة البسيطة بكثير . يمكننا التفكير فى القوة دون أن نتخيل جواداً يجر عربة ! ونحن نتكلم عن قوة الجذب بين الأرض والشمس وبين الأرض والقمر ، وعن القوة التى تسبب المد والجزر . ونتكلم عن القوة التى تجبرنا الأرض بواسطتها على أن نبقى فى دائرة نفوذها (نحن وأى شىء آخر) وعن القوة التى بفضلها تولد الريح الأمواج فى البحر وتحرك ورق الأشجار . وعند ما نلاحظ تغيراً فى السرعة نعزو السبب على العموم إلى قوة خارجية . كتب نيوتن فى مؤلفه « برنسيبيا[1] » يقول :

القوة الخارجية : هى فعل يؤثر على جسم ساكن أو متحرك بانتظام فى خط مستقيم لتغيير حالته ، وتوجد هذه القوة أثناء تأثيرها فقط ولا تبقى فى الجسم بعد انتهاء هذا التأثير ، وذلك لأن الجسم يحتفظ بكل حالة جديدة يصل إليها بواسطة قصوره الذاتى فقط . وتنشأ القوى الخارجية بطرق مختلفة ؛ فقد تنشأ عن الضغط أو التصادم أو عن القوى المركزية » .

إذا ألقى حجر من قمة برج ؛ فإن حركته لا تكون منتظمة بحال من الأحوال وتزداد سرعة الحجر أثناء سقوطه . نستنتج إذن وجود قوة خارجية تعمل فى اتجاه

(1) Principia.

الحركة ، ويمكن التعبير عن ذلك بطريقة أخرى بأن نقول أن الأرض تجذب الحجر . فلنأخذ مثالاً آخر : ماذا يحدث عند ما يقذف حجر رأسياً إلى أعلى ؟ تتناقص السرعة حتى يصل الحجر إلى أقصى ارتفاع له ثم يبدأ في السقوط . القوة التي تسبب هذا التناقص في السرعة هي نفس القوة التي تسبب ازدياد سرعة الجسم الساقط . في إحدى الحالتين كانت القوة في اتجاه الحركة ، وفي الحالة الثانية كانت القوة في عكس هـذا الاتجاه ، والقوة واحدة في الحالتين ولـكنها تسبب ازدياد السرعة أو تناقصها على حسب ما إذا كان الحجر ساقطاً أو مقذوفاً إلى أعلى .

الكميات المتجهة :

جميع الحركات التي درسناها فيما سبق هي حركات خطية ، أي في خط مستقيم والآن يجب أن نخطو خطوة إلى الأمام ، ويمكن فهم قوانين الطبيعة إلى درجة محدودة إذا درسنا أبسط الحالات وتركنا في محاولاتنا الأولى جميع التعقيدات . فالخط المستقيم أبسط من المنحنى ، ولـكن يستحيل الاكتفاء بفهم الحركة في مستقيم فقط . فحركة كل من القمر والأرض والنجوم هي حركات في مسارات منحنية ، وقد طبقت قوانين الميكانيكا بنجاح باهر على جميع هـذه الحركات . والانتقال من الحركة الخطية المستقيمة إلى الحركة على منحن يجلب صعوبات جديدة ويجب أن تـكون لدينا الشجاعة الـكافية لتخطي هذه الصعوبات إذا أردنا فهم قواعد الميكانيكا الـكلاسيكية التي أعطتنا الإرشادات الأولى وبذلك كونت نقطة الابتداء في تطور العلم .

اعتبر الآن تجربة مثالية أخرى ، حيث تتدحرج كرة منتظمة بانتظام على نضد أملس . نعلم أننا إذا دفعنا الـكرة ، أي إذا أثرنا عليها بقوة خارجية ، فإن سرعتها تتغير . لنفرض الآن أن اتجاه الدفع ليس في اتجاه الحركة كما في حالة العربة وإنما في اتجاه آخر مخالف وليكن العمودي على هذا الاتجاه مثلا . ماذا يحدث للـكرة ؟ يمـكن تمييز ثلاثة أطوار للحركة : الحركة الابتدائية ، تأثير القوة ، الحركة النهائية بعد توقف تأثير القوة . وحسب قانون القصور الذاتي ، تـكون سرعتا الـكرة

قبل وبعد تأثير القوة منتظمتين تماماً . ولكن تختلف الحركة المنتظمة بعد تأثيرها ؛ فقد تغير اتجاه الحركة . اتجاه الحركة الابتدائية للكرة واتجاه القوة متعامدان . ولا تكون الحركة النهائية للكرة فى أحد هذين الاتجاهين وإنما تقع بينهما ، ويكون اتجاهها أقرب إلى اتجاه القوة إذا كان الدفع شديداً وأقرب إلى اتجاه حركتها الأصلى إذا كان الدفع بسيطاً والسرعة الابتدائية كبيرة . نستخلص الآن النتيجة الجديدة الآتية المبنية على قانون القصور الذاتى : يتغير مقدار السرعة بصفة عامة ، وكذا اتجاهها نتيجة لتأثير القوة . وفهم هذه الحقيقة يمهد الطريق إلى التعميم الذى أدخل على علم الطبيعة بواسطة فكرة الكميات المتجهة .

يمكننا أن نستمر فى هذه الطريقة المنطقية المباشرة . وتكون نقطة الابتداء مرة أخرى هى قانون القصور الذاتى لجاليليو ، إذ لايزال مجال استخدام نتائج هذا الدليل القيم فى كشف لغز الحركة واسعاً .

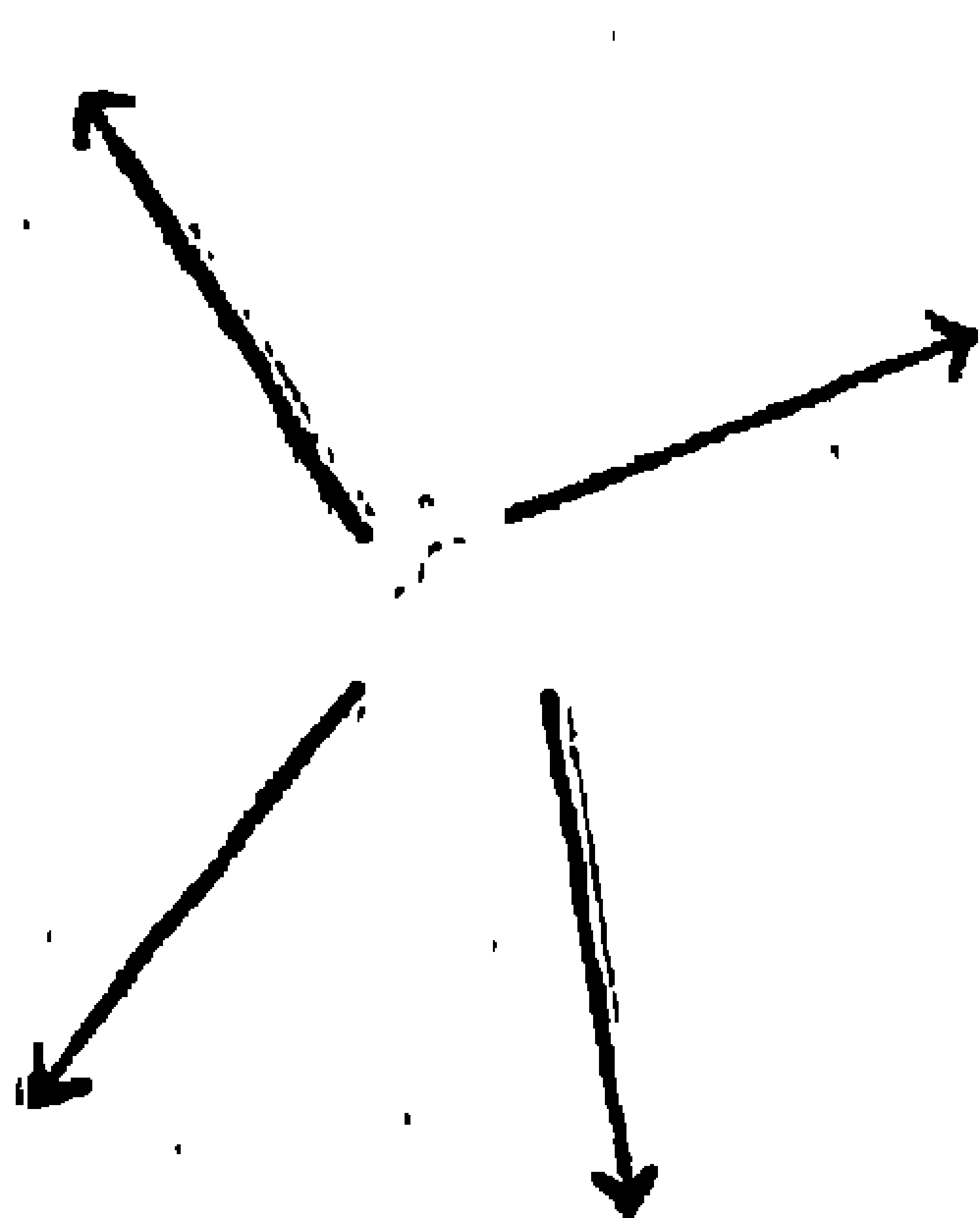
لنعتبر كرتين تتحركان فى اتجاهين مختلفين على نضد أملس . ولكى يكون لدينا صورة محددة للمسأله نفرض أن هذين الاتجاهين متعامدان نتيجة لعدم تأثير قوى خارجية ، تكون هاتان الحركتان منتظمتين تماما . زيادة على ذلك نفرض أن القيمة العددية لسرعة كلا من الكرتين واحدة ، أى أنهما يقطعان نفس المسافة فى نفس الفترة الزمنية الواحدة . ولكن هل يكون صحيحاً أن نقول أن الكرتين تتحركان بنفس السرعة ؟ يصح أن نجيب على هذا السؤال بنعم أو لا ! لقد جرت العادة أن نقول أن سيارتين تسيران بسرعة واحدة إذا كان عداد السرعة فى كل منهما يبين أربعين ميلا فى الساعة مثلا . مهما كان اتجاهى حركتهما . ولكن يجب على العلم أن يخلق لغته الخاصة وأفكاره الخاصة لاستعماله الخاص . غالباً ماتبدأ الأفكار العلمية بتلك المستعملة فى اللغة العادية التى تستخدم فى الحياة اليومية ولكنها تختلف عنها تماماً بعد تطورها . فهى تتحول وتتخلص من الغموض الذى كان يلازمها فى اللغة العادية وتصبح مضبوطة بدرجة تمكننا من تطبيقها علمياً .

من وجهة نظر علم الطبيعة يكون من الأفضل أن نقول أن سرعتى الكرتين المتحركتين فى اتجاهين مختلفين مختلفتان ، ومن الأنسب أن نقول أنه إذا تحركت

أربع سيارات متفرقة من ميدان واحد إلى أربعة شوارع مختلفة متفرعة من هذا الميدان فإن سرعاتها لا تكون متساوية حتى ولو سجلت عدادات السرعة فى كل منهما أربعين ميلا فى الساعة مثلا . وهذا التفريق بين السرعة وبين قيمتها العددية هو مثل يبين كيف يخبر علم الطبيعة إحدى الأفكار المستعملة يومياً بطريقة تثبت فائدتها فى تطورات العلم التالية .

إذا قسنا بعداً من الأبعاد فإننا نعبر من النتيجة بعدد معين من الوحدات . فطول عصا معينة قد يكون ثلاثة أقدام وتسع بوصات ، ووزن جسم معين قد يكون رطلان وثلاثة أوقيات ، كانقاس الفترات الزمنية بالدقائق والثوانى . فى كل من هذه الحالات نعبر عن نتيجة القياس بعدد ، ولكن العدد وحده لا يكفى لوصف بعض الظواهر الطبيعية ، ويعد إدراك هذه الحقيقة تقدماً واضحاً فى طريقة البحث العلمى . بالإضافة إلى العدد ، يلزم تحديد اتجاه لتعيين سرعة ما . وتسمى أية كمية من هذا القبيل أى ذات مقدار واتجاه : كمية متجهة . والرمز الذى يناسب الكمية المتجهة هو سهم . يمكن تمثيل السرعة بسهم ، أو بالاختصار ، بمتجه طوله يمثل القيمة العددية للسرعة فى نظام وحدات معين واتجاهه هو اتجاه الحركة .

إذا تفرقت أربع سيارات من ميدان واحد بسرعة لها نفس القيمة العددية فإنه يمكن تمثيل سرعاتها بأربعة متجهات متساوية الطول كما هو واضح من الشكل . فى القياس المستعمل تمثل البوصة ٤٠ ميلا فى الساعة بهذه الطريقة يمكن تمثيل أية سرعة بمتجه ، وبالعكس إذا علم المتجه ومقياس الرسم فمن الممكن الحصول على السرعة .



إذا تقابلت سيارتان تسيران فى نفس الطريق فى اتجاهين متضادين ، وكان عداد السرعة فى كل منهما يبين ٤٠ ميلا

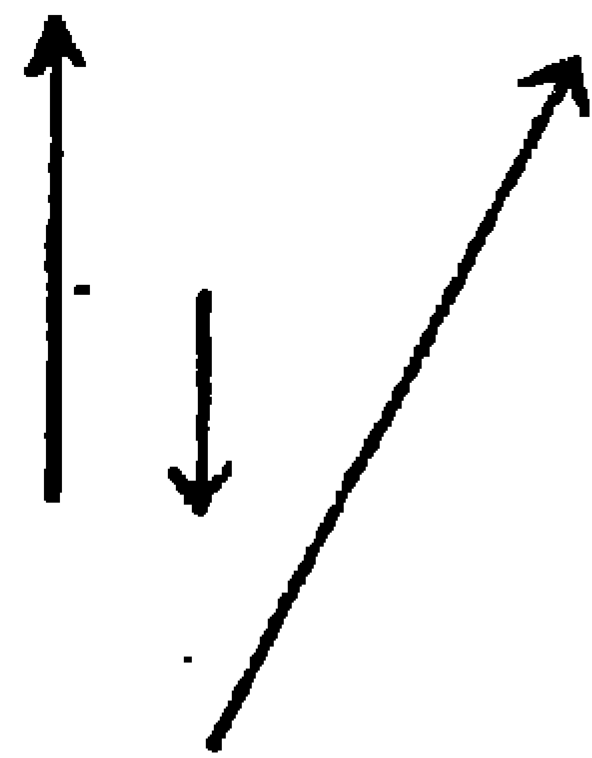
فى الساعة ، فإن سرعتيهما تمثلان بمتجهين مختلفين يشير سهم الأول فى عكس اتجاه سهم الثانى . بالمثل يجب أن يشير السهمان اللذان يبينان اتجاهى القطارات « من » و « إلى » المدينة فى اتجاهين متضادين ، ولكن جميع القطارات الموجودة فى أرصفة المحطات المختلفة والمتحركة نحو المدينة بسرعة



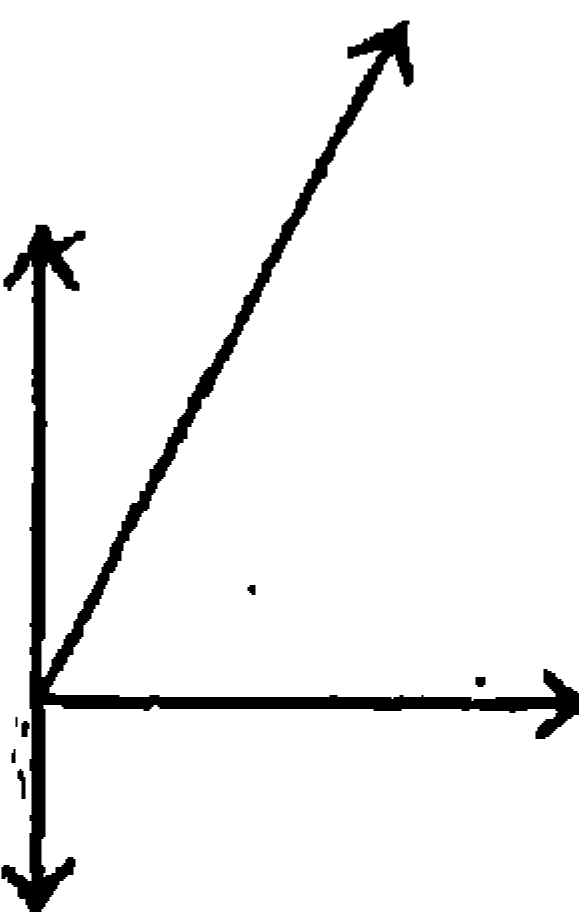
قيمتها العددية واحدة تكون لها نفس السرعة التى يمكن



تمثيلها جميعاً بمتجه واحد . ولا يوجد أى شىء فى هذا المتجه يبين المحطة التى يمر بها القطار أو الرصيف الخاص الذى كان عليه ، ومعنى ذلك أنه حسب المبدأ المتفق عليه ، يمكن اعتبار جميع هذه المتجهات ومايماثلها كما هو مبين فى الشكل متساوية ، وهى تقع فى نفس الخط أو فى خطوط متوازية وتكون متساوية الطول ، وأخيراً تشير أسهمها جميعاً إلى نفس الاتجاه .



يبين الشكل التالى متجهات غير متساوية وذلك لأنها تختلف إما فى المقدار أو فى الاتجاه أو فى كليهما ، ويمكن رسم الأربعة متجهات هذه بطريقة أخرى بحيث تتفرق جميعها من نقطة واحدة . وحيث أن نقطة الابتداء لا تهم ، يمكن أن تمثل هذه المتجهات سرعات أربع سيارات تتفرق من نقطة مرور واحدة ، أو سرعات أربع سيارات تتحرك فى أربعة أماكن مختلفة من المدينة بسرعات قيمها العددية واتجاهها كما هو مبين فى الشكل .



يمكننا الآن استعمال التمثيل بالمتجهات فى شرح الحقائق الخاصة بالحركة الخطية التى بحثناها من قبل . لقد تكلمنا عن عربة تتحرك بانتظام

فى خط مستقيم ، تدفع فى اتجاه حركتها فتزداد سرعتها . يمكن تمثيل ذلك بيانياً بمتجهه ، الأول قصير ويمثل السرعة قبل الدفع ، والثانى أطول وله نفس الاتجاه ويمثل السرعة بعد الدفع ومعنى المتجه المتقطع واضح ؛ فهو يمثل التغير فى السرعة الذى سببه الدفع . والحالة التى تكون فيها القوة فى عكس اتجاه الحركة والتى تنقص فيها السرعة ، يختلف فيها الرسم بعض الشىء عما سبق . مرة أخرى يناظر المتجه المنقطع التغير فى السرعة ولكن يختلف اتجاهه فى هذه الحالة . ومن الواضح أن التغير فى السرعة هو كمية متجهة مثل السرعة نفسها . ولكن كل تغيير فى السرعة ينتج عن تأثير قوة خارجية ، وعلى ذلك يجب أن تمثل هذه القوة بمتجه أيضاً . ولكى تعين القوة لا يكفى أن نحدد الشدة التى تدفع بها العربة ، وإنما يجب أن نحدد أيضا اتجاه الدفع . والقوة مثلها فى ذلك مثل السرعة ومثل التغير فى السرعة يجب تمثيلها بمتجه وليس بعدد فقط . وعلى ذلك : القوة الخارجية هى أيضاً كمية متجهة ، ويجب أن يكون اتجاهها هو اتجاه التغير فى السرعة . فى الشكلين السابقين تبين المتجهات الممثلة بخطوط متقطعة اتجاه القوة حيث أنها تمثل التغير فى السرعة .

١

٢

١

٢

وربما يقول المتشائم هنا أنه لا يجد ميزة فى استعمال التجهات ، وإن كل ما حدث هو ترجمة حقائق معلومة لنا إلى لغة معقدة وغير عادية . ويصعب فى هذه المرحلة إقناع مثل هذا الشخص بخطأ تفكيره ؛ وحتى الآن هو فى الواقع محق فى قوله ولكننا سنرى أن نفس هذه اللغة الغريبة ستقودنا إلى تعميم هام يستلزم وجود التجهات .

لغز الحركة :

باقتصارنا على دراسة الحركة الخطية فقط ، نبقى بعيدين عن فهم الحركات التى نراها يوميا فى الحياة . لذلك يجب علينا بحث الحركة فى مسارات منحنية ؛ وخطوتنا التالية هى تعيين القوانين التى تحدد مثل هذه الحركة . وليس هذا بالعمل السهل . لقد أثبتت أفكارنا عن السرعة وتغيرها والقوة فائدتها العظيمة فى حالة الحركة الخطية . ولكننا لا نرى على الفور كيفية تطبيق هذه الافكار على الحركة فى مسار منحن . ومن الممكن طبعا أن نتصور أن الأفكار القديمة لا تفيد فى وصف الحركة العامة وأن من اللازم إيجاد أخرى جديدة . هل سنسير فى طريقنا القديم أم سنبحث عن آخر جديد ؟

من العمليات التى تستخدم كثيراً فى العلم عملية تعميم فكرة معينة ، وطريقة التعميم نفسها ليست محددة ، لأنه توجد فى الغالب طرق مختلفة للقيام به ولكن يجب أن يتحقق شرط معين : يجب أن تؤول أية فكرة بعد تعميمها إلى الفكرة الأصلية إذا توفرت الشروط الأصلية .

وأنسب طريقة لتوضيح ذلك هو بحث المثال الموجود بين يدينا . يمكننا محاولة تعميم أفكارنا القديمة عن السرعة ، التغير فى السرعة ، القوة فى حالة الحركة فى مسار منحن . وعبارة المسارات المنحنية تشمل الخطوط المستقيمة فالخط المستقيم حالة خاصة وتافهة من المنحنى . وعلى ذلك إذا أدخلت فكرة السرعة ، والتغير فى السرعة والقوة لحالة الحركة فى خط منحن فإنها تكون قد أدخلت أوتوماتيكيا للحركة فى خط مستقيم ويجب ألا تتعارض هذه النتيجة مع النتائج التى حصلنا عليها سابقا . إذا أصبح المنحنى خطا مستقيما وجب أن تؤول الأفكار العامة الجديدة إلى الافكار المألوفة التى استطعنا بواسطتها وصف الحركة الخطية . ولكن هذا الشرط لا يكفى لتعيين التعميم الوحيد المطلوب ، إذ قد يستوفى هذا الشرط بأكثر من طريقة واحدة . ويبين لنا تاريخ العلم أن أبسط تعميم ممكن ينجح

فى بعض الاحيان ويفشل فى أحيان أخرى . وتخمين طريقة التعميم الصحيحة فى حالتنا الخاصة هذه بسيط للغاية . وستجد أن الأفكار الجديدة مفيدة للغاية وانها كما تساعد على فهم حركة حجر مقذوف فى الهواء تساعد أيضا على فهم حركة الكواكب .

والآن على أى شيء تدل كلمات السرعة ، التغير فى السرعة ، القوة ، فى الحالة العامة ، أى فى حالة الحركة فى خط منحن ؟ فلنبدأ بالسرعة . يتحرك جسم صغير جداً على المنحنى من اليسار إلى اليمين . يسمى مثل هذا الجسم الصغير فى أغلب



الأحيان نقطة مادية . وتبين الدائرة الصغيرة على المنحنى فى الشكل السابق موضع النقطة المادية عند لحظة معينة من الزمن . ماهى السرعة التى تناظر هذا الموضع وهذه اللحظة الزمنية ؟ مرة أخرى يبين دليل جاليليو طريقة لتعريف السرعة ويجب أن نلجأ إلى الخيال مرة أخرى ونفكر فى تجربة مثالية . تتحرك النقطة المادية على المنحنى من اليسار إلى اليمين تحت تأثير قوى خارجية فلنتخيل الآن أنه عند لحظة معينة وعند النقطة التى تدل عليها الدائرة الصغيرة ، توقفت جميع هذه القوى عن التأثير . حسب قانون القصور الذاتى يجب أن تصبح الحركة منتظمة نتيجة لذلك . فى الحياة العملية يستحيل علينا بالطبع أن نمنع جميع القوى الخارجية من التأثير على جسم ما ويمكننا فقط أن نقول « ماذا يحدث إذا ... ؟ » ونحكم على صحة هذا التفكير بالنتائج التى نحصل عليها منه وباتفاق هذه النتائج مع التجربة .

يبين المتجه فى الشكل التالى اتجاه الحركة المنتظمة كما نتصوره على فرض تلاشى جميع القوى الخارجية وهو اتجاه المستقيم المسمى بالمماس . وإذا نظرنا بالميكروسكوب إلى النقطة المادية المتحركة فإننا لا نرى إلا جزءا صغيراً جداً من

المنحنى ويظهر هذا الجزء كقطعة مستقيمة صغيرة ، والماس هو امتداد هذه القطعة



والمتجه المبين يمثل السرعة عند لحظة معلومة ويقع متجه السرعة على الماس. ويمثل طول هذا المتجه القيمة العددية للسرعة كما يبينها عداد السرعة فى سيارة مثلا .

يجب ألا نهتم كثيرا بالتجربة المثالية التى نفترض فيها تلاشى القوة لكى نحصل على اتجاه السرعة فهى تساعدنا فقط على فهم مايجب أن نسميه متجه السرعة وتمكننا من تعيينه عند موضع معين ولحظة معينة .

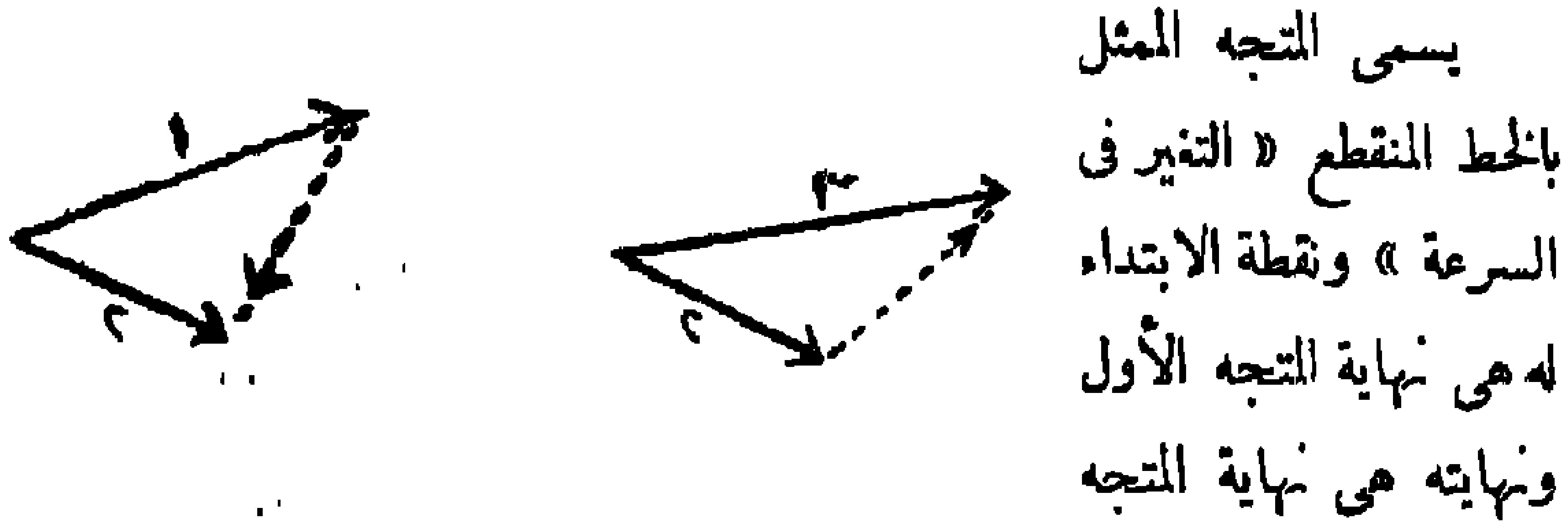
الشكل التالى يبين متجهات سرعة نقطة مادية تتحرك على منحنى عند ثلاثة مواضع مختلفة : فى هذه الحالة يتغير كل من اتجاه السرعة ومقدارها (الذى يمثل بطول المتجه) أثناء الحركة .



هل تحقق هذه الفكرة الجديدة عن السرعة جميع ما تتطلبه فى التعميمات المختلفة أى هل تؤول هذه الفكرة إلى الفكرة المألوفة للسرعة عند ما يصبح المنحنى خطاً مستقيما ؟ من الواضح أنها تحقق ذلك . فالماس لخط مستقيم هو المستقيم نفسه ويقع متجه السرعة على خط الحركة نفسه كما فى حالة العربة المتحركة أو الكرات المتدحرجة .

وخطوتنا التالية هى إيجاد معنى التغير فى سرعة نقطة مادية تتحرك فى منحنى . يمكن الحصول على ذلك بطرق مختلفة وسنختار أبسطها وأنسبها . يبين الشكل السابق عدة متجهات للسرعة تمثل الحركة عند نقط مختلفة من المسار ويمكن كما

رأينا من قبل رسم المتجهين الأول والثانى مرة أخرى بحيث يشتركان فى نقطة الابتداء .



يسمى المتجه الممثل بالخط المنقطع « التغير فى السرعة » ونقطة الابتداء له هى نهاية المتجه الأول ونهايته هى نهاية المتجه الثانى . ولأول وهلة قد يظهر تعريف التغير فى السرعة هذا كأنه عديم المعنى ومتكلف . ويزداد وضوح هذا التعريف عندما يكون اتجاه المتجهين (١) ، (٢) واحداً . ومعنى ذلك طبعا هوالعودة إلى حالة الحركة فى خط مستقيم . إذا كانت نقطة ابتداء المتجهين واحدة فإن المتجه المنقطع يصل بين نهايتيهما أيضا . ويصبح الرسم فى هذه الحالة مطابقا للموجود فى (ص ١٢) ونحصل على الفكره القديمة كحالةخاصةمن الفكرةالجديدة . وقديكون



من المفيد أن نشير هنا إلى أننا اضطررنا للفصل بين الخطين فى الرسم السابق لكى لا ينطبقا ويصبح من المستحيل التفريق بينهما .

يبق علينا الآن أن نخطو الخطوة الأخيرة فى عملية التعميم هذه وهى أهم التخمينات التى فكرنافيها إلى الآن يجب إيجاد العلاقة بين القوة والتغير فى السرعة وذلك لكى نصوغ الدليل الذى يمكننا من فهم موضوع الحركة العام .

لقد كان الدليل الذى أدى إلى شرح الحركة فى خط مستقيم بسيطا . القوى الخارجية هى سبب التغير فى السرعة ، وإذاً يكون لمتجه القوة نفس اتجاه هذا التغير . والآن ما الذى سنأخذه كدليل لشرح الحركة فى منحنى ؟ نفس الشىء تماما ! والفرق الوحيد هو أن لتغير السرعة الآن معنى أوسع من معناه السابق ونظرة واحدة إلى المتجهات الممثلة بخطوط متقطعة فى الشكلين السابقين توضح

هذه النقطة تماما . إذا أعطيت السرعة عند جميع نقط المنحنى فإنه يمكننا على الفور استنتاج اتجاه القوة عند أى نقطة . ويجب رسم متجهى السرعة عند لحظتين متقاربتين جدا وبذلك تناظران موضعين قريبين جدا من بعضهما . والمتجه الواصل بين نهاية المتجه الأول إلى نهاية المتجه الثانى يبين اتجاه القوة المؤثرة ولكن من المهم جداً أن تكون الفترة الزمنية بين اللحظتين اللتين تمثل السرعة عندهما بهذين المتجهين «صغيرة جداً» والتحليل الدقيق للعبارات التى تماثل «قريبة جداً» ، «صغيرة جداً» ليس سهلا على الاطلاق . والواقع أن هذا التحليل هو الذى قاد نيوتن وليبنتز إلى اكتشاف حساب التفاضل .

إن الطريق الذى يقودنا إلى تعميم دليل جاليليو متعب للغاية . ولا يمكننا أن نبين هنا كثرة نتائج هذا التعميم وفوائد هذه النتائج . وتطبيق هذا التعميم يقودنا إلى كثير من التفسيرات البسيطة المقنعة لكثير من الحقائق التى كانت مفككة وغير مفهومة قبل ذلك .

من بين الحركات الكثيرة التى لا حصر لها سنختار أبسطها فقط ونطبق القانون الذى وجدناه الآن فى شرحها .

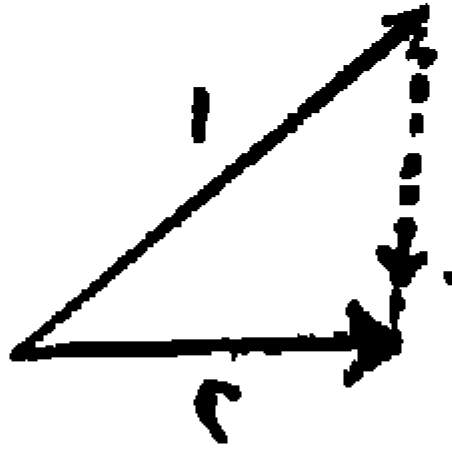
إذا أطلقت رصاصة من بندقية ، أو قذف حجر فى اتجاه مائل ، أو اندفع ماء من خرطوم ، فإنها جميعاً ترسم مسارات متشابهة ومألوفة لنا . هذه المسارات هى قطاعات مكافئة . تصور عداداً للسرعة مثبتا فى حجر مثلا ، وذلك لكى نتمكن من رسم متجه سرعته عند أي لحظة . والرسم التالى يبين النتيجة .

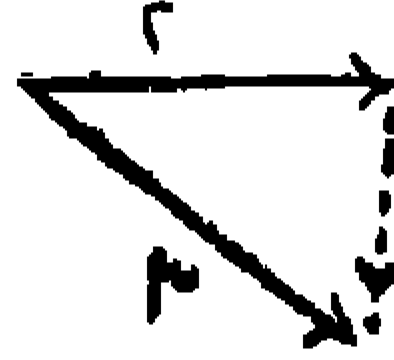


اتجاه القوة المؤثرة على الحجر هو نفس اتجاه التغير فى سرعته ، وقد رأينا كيف نعين هذا الأخير ، والنتيجة المبينة فى الرسم التالى توضح أن القوة رأسية

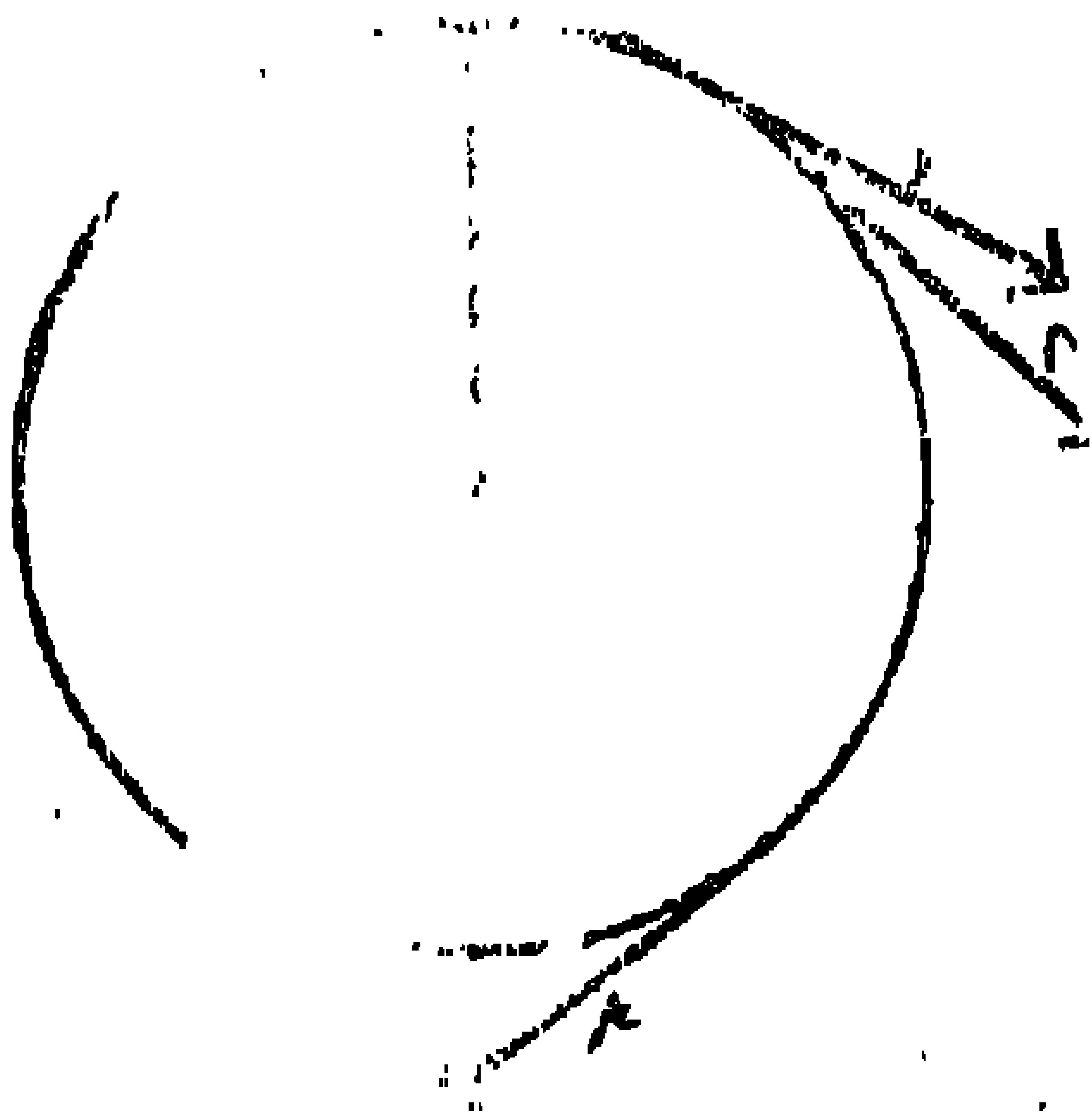
إلى أسفل . ويحدث نفس الشيء فى حالة سقوط حجر من قمة برج .

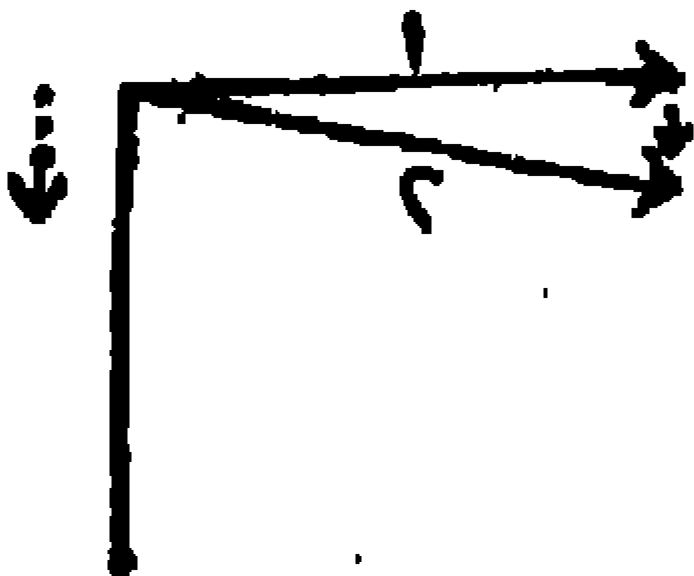
المساران مختلفان وكذلك السرعتان ولكن التغير فى السرعة له نفس الاتجاه ، وهو نحو مركز الأرض .





إذا ربطنا حجر فى نهاية خيط وجعلناه يدور فى مستوى أفقى فإنه يتحرك فى مسار دائرى. أطوال جميع المتجهات الموجودة فى الشكل الذى يمثل هذه الحركة تكون متساوية إذا كانت القيمة العددية للسرعة ثابتة وبالرغم من ذلك فإن السرعة ليست منتظمة . لأن المسار ليس خطاً مستقيما ، والحركة المنتظمة فى خط مستقيم هى الحركة الوحيدة الممكن حدوثها دون تأثير قوى ، وفى حالتنا هذه توجد قوى مؤثرة والذى يتغير هو اتجاه السرعة لا قيمتها وحسب قانون الحركة يتحتم وجود قوة ما تسبب هذا التغير ، وهى فى هذه الحالة قوة بين الحجر وبين اليد الممسكة بالخيط . ويطرأ السؤال الآتى على الذهن فوراً : ما هو اتجاه تأثير هذه القوة ؟ مرة أخرى يعطينا رسم المتجهات الجواب : نرسم متجهى السرعة عند نقطتين قريبتين جداً ومن ذلك نحصل على التغير فى السرعة . نلاحظ أن هذا المتجه الأخير له نفس اتجاه الخيط ويكون دائماً عمودياً على اتجاه السرعة أى على المماس . أى أن اليد تؤثر على الحجر بقوة بواسطة الخيط .





ودوران القمر حول الأرض مثال مشابه للسابق وذو أهمية كبرى . ويمكن

تمثيل هذا الدوران تقريبيا بحركة دائرية منتظمة . وتتجه القوة نحو الأرض لنفس السبب الذى كانت القوة من أجله موجهة نحو اليد فى المثال السابق . لا يوجد خيط يصل بين القمر والأرض ولكن يمكننا أن نتخيل خطا واصلا بين مركزى هذين الجسمين . تقع القوة على هذا الخط وتكون نحو مركز الأرض ، مثلها فى ذلك مثل القوة المؤثرة على الحجر المقذوف فى الهواء أو الساقط من برج .

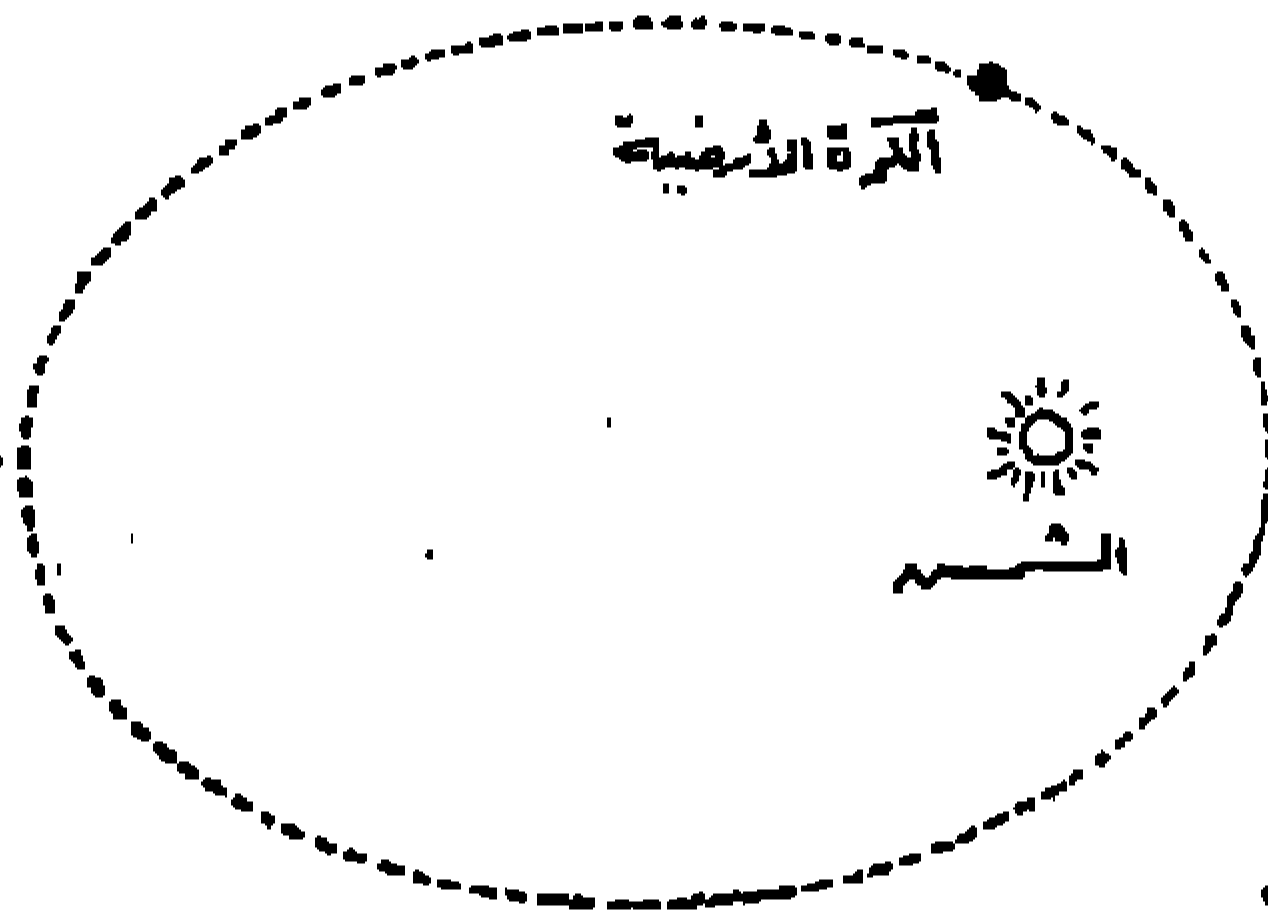
ويمكن تلخيص جميع ما قلناه عن الحركة فى جملة واحدة . القوة والتغير فى السرعة متجهان لهما نفس الاتجاه . هذا هو الدليل الأول لمعضلة الحركة ، ولكن من المؤكد أنه لا يكفى لتفسير جميع الحركات التى نراها تفسيراً تاماً . لقد كان التحول من طريقة تفكير أرسطاليس إلى طريقة تفكير جاليليو من أهم الأسس التى بنى عليها العلم . فبعد هذا التحول أصبح طريق التطورات التالية واضحاً ، والذى يهمنا هنا هو مراحل التطور الأولى ، وتتبع الأدلة الأولى وتوضيح كيف تنشأ الأفكار العلمية نتيجة للصراع العنيف مع الأفكار القديمة . نحن نهتم هنا بالأعمال العظيمة فى العلم فقط مثل إيجاد طرق جديدة وغير متوقعة للبحث ومثل مخاطرات التفكير العلمى التى تخلق صورة دائمة التغير للكون . وتكون الخطوات الأولى الأساسية ذات طابع ثورى دائما . فالخيال العلمى يرى أن الأفكار القديمة ضيقة ومحدودة فيغيرها بأخرى جديدة ، والإنتاج المستمر حول فكرة موجودة فعلا يكون دائماً أقرب إلى التطور إلى أن تصل إلى مرحلة معينة فيصبح من الضرورى فتح مجال جديد ، ومع ذلك فلكى نفهم الأسباب والصعوبات التى تسبب تغيراً فى مبادىء هامة يجب علينا أن نعلم الأدلة الأولى وأيضاً النتائج التى يمكن استخلاصها منها .

من أهم مميزات علم الطبيعة الحديث أن النتائج المستخلصة من الأدلة الأولى ليست نوعية فقط بل كمية أيضاً . فلنعتبر مرة أخرى حالة الحجر الساقط من برج لقد رأينا أن سرعته تزداد بازدياد المسافة التى يسقطها ولكننا نريد أن نعلم أكثر من ذلك ، ما هو مقدار التغير فى السرعة ؟ وما هى سرعة وموضع الحجر عند لحظة معينة بعد بدء الحركة ؟ نريد أن يكون فى استطاعتنا التنبؤ بما سيحدث

وأن نعين بالتجربة مدى صحة هذا التنبؤ وبالتالى مدى صحة الفروض الأولى .

وللحصول على نتائج كمية يجب استعمال لغة الرياضة . معظم أفكار العلم الأساسية بسيطة فى لبها ويمكن فى أغلب الأحيان التعبير عنها بلغة يفهمها الشخص العادى . وتتبع هذه الأفكار يستلزم الإلمام بطرق بحث متقدمة للغاية ، ولكى نستخلص نتائج يمكن مقارنتها بما نحصل عليه من التجارب يجب استخدام علم الرياضة كوسيلة منطقية . يمكننا أن نتجنب استعمال لغة الرياضة ما دمنا لا نهتم إلا بالأفكار الطبيعية الأساسية . وحيث أننا نفعل ذلك باستمرار فى هذا الكتاب ، سنضطر فى بعض الأحيان أن نكتفى بذكر النتائج الضرورية لفهم الأدلة الهامة التى تنشأ عن التطورات التالية دون ذكر البرهان . والثمن الذى ندفعه لتجنب لغة الرياضة هو نقص فى الدقة واضطرارنا فى بعض الأحيان إلى ذكر نتائج دون أن نبين كيفية الوصول إليها .

وأحد الأمثلة الهامة هو حركة الأرض حول الشمس . من المعلوم أن المسار هو منحنى مقفل يسمى قطع ناقص . برسم شكل يبين متجهات التغير فى السرعة ، نرى أن اتجاه القوة المؤثرة على الأرض هو نحو الشمس . ولكن هذه المعلومات ليست كاملة مطلقاً فنحن نود أن يكون فى استطاعتنا أن نعلم موضع الأرض والكواكب الأخرى عند أى وقت ، ونود أيضاً أن يكون فى استطاعتنا التنبؤ بوقت حدوث وفترة استمرار الكسوف الشمسى التالى وبكثير من الظواهر الفلكية الأخرى . إن هذا ممكن ولكن ليس على أساس الدليل الأول فقط



لأنه يتحتم للحصول على المعلومات السابقة معرفة اتجاه القوة وأيضاً قيمتها المطلقة أى مقدارها . ونيوتن هو الذى اتجه الاتجاه الصحيح عند هذه النقطة . وقد كان عمله عظيما حقاً . فحسب قانون الجاذبية المنسوب له ترتبط قوة الجذب بين جسمين

ارتباطاً بسيطاً بالبعد بينهما . وتصغر القوة عندما يزداد هذا البعد . ولكي نكون أكثر دقة نقول أن القوة تصغر إلى $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$ قيمتها عندما يتضاعف البعد، وإلى $\frac{1}{3} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{9}$ قيمتها عندما يزداد البعد إلى ثلاثة أمثاله .

على ذلك نرى أنه يمكن في حالة قوة الجذب التعبير ببساطة عن الارتباط بين القوة وبين البعد بين الجسمين المتحركين .

نتبع نفس الطريقة في جميع الحالات الأخرى التي تؤثر فيها قوى أخرى مختلفة مثل القوى المغناطيسية والكهربائية وما شابهها ، ونحاول أن نعبر بصيغة بسيطة عن القوة ولا نكون محقين في التعبير عن القوة بهذه الصيغة إلا إذا حققنا النتائج المستخلصة منها بالتجربة .

ولكن معرفة قوة الجذب وحدها لاتكفي لتعيين حركة الكواكب: لقد رأينا أن المتجهين اللذين يمثلان القوة وتغير السرعة في فترة زمنية قصيرة يكونان في نفس الاتجاه . يجب الآن أن نتبع نيوتن ونخطو خطوة أخرى فنفترض علاقة بسيطة بين طولي هذين المتجهين . تحت نفس الشروط السابقة ، أي إذا اعتبرنا حركة نفس الجسم في فترات صغيرة من الزمن فرأى نيوتن أن التغير في السرعة سيتناسب مع القوة . أي أنه يلزم تخمين فكرتين مكملتين لبعضهما للحصول على نتائج كمية لحركة الكواكب . الفكرة الأولى عامة وهي تعطي العلاقة بين القوة والتغير في السرعة . والثانية خاصة وهي تحدد بالضبط العلاقة بين القوة المؤثرة المعينة وبين البعد بين الجسمين . والفكرة الأولى هي قانون الحركة لنيوتن والثانية هي قانون الجاذبية له أيضا . والفكرتان معاً تعينان الحركة تماما . ويتضح ذلك من المنطق التالي الذي قد يبدو غامضا بعض الشيء . نفرض اننا عند لحظة معينة نعلم موضع وسرعة كوكب وأيضاً القوة المؤثرة عليه . باستعمال قوانين نيوتن نستطيع أن نعين التغير في السرعة في فترة زمنية قصيرة . وحيث أننا نعلم الآن السرعة الابتدائية وتغيرها ، يكون في استطاعتنا تعيين موضع وسرعة الكوكب في نهاية الفترة الزمنية . بالتكرار المستمر لهذه العملية ، يمكن الحصول على المسار الكامل للكوكب دون الحاجة إلى أية أحصائيات أخرى من التي نحصل عليها بالمشاهدة

وهذه هى الطريقة النظرية التى تستطيع الميكانيكا بواسطتها أن تتنبأ بسير جسم متحرك ، ولكن يصعب تطبيق هذه الطريقة عمليا . فى الواقع تكون هذه الطريقة متعبة للغاية وغير دقيقة . ومن حسن الحظ اننا غير مضطرين لاستعمال هذه الطريقة ، فعلم الرياضة يهيء طريقا أقصر يمكننا من وصف الحركة وصفا دقيقا والمجهود المستعمل الذى يبذل فى ذلك يكون أقل بكثير من المجهود الذى يبذل فى كتابة جملة واحدة . ويمكن التأكد من صحة أو خطأ النتائج التى يحصل عليها من هذا الطريق بالمشاهدة .

القوة التى تلاحظها فى حركة الحجر الساقط فى الهواء والقوة التى تلاحظها فى دوران القمر فى مساره هما قوتان من نوع واحد ألا وهوجذب الأرض للاجسام المادية . ولقد أدرك نيوتن أن حركة الأحجار الساقطة وحركة القمر والكواكب ليست إلا ظواهر خاصة لقوة جذب عامة تؤثر بين أى جسمين . فى الحالات البسيطة يمكن باستعمال علم الرياضة وصف الحركة والتنبؤ بها . أما فى الحالات المعقدة التى تشمل تأثير أجسام كثيرة على بعضها فلا يكون من السهل وصف الحركة رياضيا ولكن تبقى القواعد الأساسية بدون تغير .

نرى الآن أن النتائج التى توصلنا اليها بتتبع الأدلة الأولى صحيحة فى حالة حركة الحجر المقذوف وفى حالة حركة القمر والأرض والكواكب .

والذى يجب اختبار صحته بالتجربة العملية هو طريقتنا فى التفكير جميعها . ولا يمكن اختبار صحة أى من الفروض على حدة . ولقد نجحت قوانين الميكانيكا هذه نجاحا باهرا فى تفسير حركة الكواكب حول الشمس ، ومع ذلك فقد توجد قوانين أخرى مبنية على فروض مختلفة وتنجح أيضا فى تفسير ذلك .

أن نظريات علم الطبيعة هى ابتكارات حرة للعقل البشرى وليست كما قد يظهر ، وحيدة ومحدودة تماما بالعالم الخارجى ، ونحن فى محاولتنا فهم الحقيقة نشبه رجلا يحاول فهم تركيب ساعة مغلقة . وهو يرى وجهها وعقاربها المتحركة ويسمع أيضا دقاتها ولكنه لايستطيع فتح صندوقها . وإذا كان الرجل عبقريا فإنه قد يستطيع أن يكون صورة ما لتركيب قد يسبب جميع مايشاهده ، ولكنه لن يكون

بحال من الأحوال متأكداً من أن هذا هو التركيب الوحيد الذى يسبب مشاهداته ويستحيل عليه أيضا أن يقارن الصورة التى كونها لنفسه بالتركيب الحقيقى ، بل أنه ليتعذر عليه أن يتخيل امكان أو معنى هذه المقارنة . ولكن من المؤكد أنه يعتقد أنه كلما زاد من معلوماته كلما أصبحت الصورة التى يكونها عن الواقع بسيطة وكلما فسرت هذه الصورة عددا أكبر من مشاهداته . كما أنه قد يعتقد فى وجود النهاية المثالية للمعرفة وفى اقتراب العقل البشرى منها . وربما اطلق على هذه النهاية المثالية لفظ الحقيقة الموضوعية .

يبقى دليل آخر :

يهيأ للانسان عند البدء فى دراسة الميكانيكا ، أن كل شىء فى هذا الفرع من العلوم بسيط وأن مجال البحث فيه قد انتهى ، ويندر أن يفكر الانسان فى وجود دليل هام لم يلاحظه أحد لمدة ثلاثة قرون . ويرتبط هذا الدليل الذى عانى الاهمال باحدى الأسس الهامة فى الميكانيكا — الكتلة .

سنعود مرة أخرى إلى تجربتنا المثالية البسيطة . حركة عربة على طريق أملس تماما . إذا كانت العربة ساكنة عند بدء الحركة ثم دفعت فإنها تتحرك بعد ذلك بسرعة منتظمة معينة . نفرض الآن أن من الممكن إعادة هذه العملية بحذافيرها أى عدد مطلوب من المرات بحيث تؤثر نفس القوة فى نفس الاتجاه على نفس العربة مهما كان عدد مرات تكرار هذه التجربة فإننا نحصل دائما على نفس السرعة النهائية . ماذا يحدث لو أننا غيرنا التجربة أى ماذا يحدث مثلا لو أن العربة كانت فارغة فى التجربة الأولى ومحملة فى الثانية ؟ تكون السرعة النهائية للعربة المحملة أقل من السرعة النهائية للعربة الفارغة . من ذلك نستنتج أنه إذا أثرت قوة واحدة على جسمين مختلفى الكتلة فحركتهما من حالة السكون فإن سرعتيهما الناتجتين لا تكونا متساويتين أى أن السرعة تتوقف على كتلة الجسم وتكون السرعة أقل إذا كانت الكتلة أكبر .

على ذلك نستطيع ، ولو نظريا ، أن نعين كتلة جسم ما ، أو بعبارة أدق

نستطيع أن نعين النسبة بين كتلة جسم ما وكتلة جسم آخر فإذا كان لدينا قوتان متساويتان تؤثران على كتلتين ساكنتين ، ووجدنا أن سرعة الكتلة الأولى بعد التأثير تساوى ثلاثة أضعاف سرعة الكتلة الثانية فإننا نستنتج أن الكتلة الأولى تساوى ثلث الكتلة الثانية . وطبعا ليست هذه بطريقة عملية لتعيين النسبة بين كتلتين . ومع ذلك فيمكننا أن نتخيل أننا قد تمكنا من تعيين هذه النسبة إما بهذه الوسيلة أو بأية وسيلة أخرى مبنية على قانون القصور الذاتى .

كيف نقدر الكتل فى الحياة العملية ؟ طبعا ليس بالطريقة التى ذكرناها فيما سبق . كل شخص يعرف الإجابة الصحيحة لهذا السؤال ، فنحن نقدر الكتل بوزنها على ميزان .

دعنا نبحث بالتفصيل الطريقتين المختلفتين لتعيين الكتلة .

لا توجد أية علاقة بين التجربة الأولى وبين الجاذبية الأرضية فالعربة تتحرك بعد الدفع على مستو أفقى أملس . وقوة الجاذبية التى تسبب بقاء العربة على المستوى تبقى ثابتة ولا تدخل مطلقا فى تعيين الكتلة . أما حالة الوزن فتختلف عن ذلك . يستحيل علينا استعمال الميزان إذا لم تجذب الأرض الأجسام ، أى إذا لم توجد قوة الجاذبية . الفرق بين طريقتى تعيين الكتلة هو أنه لاعلاقة للأولى بقوة الجاذبية بينما أساس الثانية هو وجود هذه القوة .

وتتساءل الآن هل نحصل على نفس النتيجة إذا عينا النسبة بين الكتلتين بكل من الطريقتين السابقتين ؟ وتعطينا التجارب إجابة صريحة على هذا السؤال . النتيجة هى نفسها بالضبط فى الحالتين ! هذه النتيجة التى كان من المستحيل التنبؤ بها مبنية على المشاهدة لا على المنطق . دعنا لغرض التبسيط نسمى الكتلة المعينة بالتجربة الأولى كتلة القصور الذاتى أو الكتلة القاصرة والأخرى المعينة بالتجربة الثانية كتلة الجاذبية . هاتان الكتلتان متساويتان فى الكون الذى نعيش فيه ولكن يمكننا أن نتصور إمكان عدم تساويهما وينشأ السؤال الآخر الآتى فوراً : هل تساوى هاتين الكتلتين مجرد صدفة أم له مغزى أعمق من ذلك ؟ يجيب علم الطبيعة الكلاسيكى على هذا السؤال كما يأتى : تساوى هاتين الكتلتين مجرد مصادفة

ولا يوجد أى مغزى له أما إجابة علم الطبيعة الحديث فعكس ذلك تماما : تساوى هاتين الكتلتين شيء أساسى يكون دليلا هاما يؤدى إلى فهم أعمق للموضوع . ولقد كان هذا الدليل فى الواقع أحد الأدلة العظيمة الأهمية التى أدت إلى تكوين النظرية المسماة بالنظرية النسبية العامة .

تبدو القصص البوليسية تافهة إذا فسرت فيها الأحداث الغريبة كمصادفات وتكون القصة شيقة أكثر إذا تبعت حوادثها نظاما معينا . بنفس الطريقة تكون النظرية التى تفسر تساوى كتلتى الجاذبية والقصور الذاتى تبز النظرية التى تجعل من هذا التساوى مصادفة بحتة ، على شرط أن تكون كلا من النظريتين متفقة مع الحقائق المشاهدة .

حيث أن تساوى كتلتى التثاقل والقصور الذاتى كان ضروريا لتكوين النظرية النسبية ، فإنه يحق لنا أن نبحثه هنا بتعمق . ماهى التجارب التى تقنعنا بأن الكتلتين متساويتان ؟ والإجابة هى تجربة جاليليو القديمة . فى هذه التجربة ألقى جاليليو كتلا مختلفة من برج فلاحظ أن الزمن اللازم لسقوط كل منها كان واحداً . أى أن حركة الجسم الساقط لا تتوقف على كتلته . لربط هذه النتيجة العملية البسيطة ذات الأهمية البالغة بتساوى الكتلتين نحتاج إلى منطق معقد .

يتحرك جسم ساكن نتيجة لتأثير قوة خارجية ويكتسب بذلك سرعة معينة . وتتوقف سرعته على كتلة قصوره الذاتى فمقاومته للحركة تكون أكبر إذا كانت كتلته أكبر . ويمكننا أن نقول دون أن ندعى الدقة : يتوقف تأثير القوى الخارجية على جسم ما على كتلة قصوره الذاتى . إذا كانت الأرض تجذب جميع الأجسام بقوى متساوية ، فلا بد أن يكون سقوط الأجسام التى كتلة قصورها الذاتى كبيرة أبطأ من سقوط الأجسام التى كتلة قصورها الذاتى صغيرة . ولكن الحالة تختلف عن ذلك : جميع الأجسام تسقط بنفس الطريقة . وعلى ذلك يتحتم أن تكون قوة جذب الأرض للكتل المختلفة مختلفة . ولكن الأرض تجذب الأجسام بقوة الجاذبية ولا توجد لها أية علاقة بكتله القصور الذاتى . والقوة التى نسميها قوة جذب الأرض تتوقف على كتلة الجاذبية . ولكن حركة الحجر الناتجة تتوقف على كتلة

القصور الذاتى . وحيث أن هذه الحركة الناتجة عن قوة الجاذبية واحدة دائماً (جميع الأحجار الساقطة من نفس الارتفاع تسقط بنفس الطريقة) ، على ذلك يتحتم أن تكون كتلة الجاذبية هى نفس كتلة القصور الذاتى .

وقد يصوغ عالم الطبيعة القانون السابق فى الصيغة الغامضة الآتية :

تزداد عجلة الجسم الساقط بازدياد كتلة جاذبيته وتتناسب معها ، وتتناقص بتناقص كتلة قصوره الذاتى وتتناسب معها . وحيث أن جميع الأجسام الساقطة لها نفس العجلة فيتحتم أن تتساوى الكتلتان . فى قصتنا الغامضة لا توجد مسائل حلت حلا كاملا وانتهى منها إلى الأبد . فبعد ثلاثمائة عام اضطررنا أن نعود إلى مسألة الحركة الأولية وذلك لنراجع طريقة البحث ولنجد أدلة كنا قد أهملناها ، بذلك حصلنا على صورة مختلفة للكون المحيط بنا .

نظرية السيال للحرارة :

سنبدأ هنا فى تتبع دليل جديد ينشأ عن ظواهر الحرارة . ومع ذلك فمن المتعذر تقسيم العلم إلى أقسام متفرقة لا علاقة بينها . والواقع أننا سنجد أن المبادئ التى سنبحثها هنا وتلك التى درسناها فعلا والتى سندرسها فيما بعد تكون جميعها شبكة متداخلة . وفى كثير من الأحيان يمكن تطبيق طريقة بحث فرع معين من فروع العلم عند بحث فروع أخرى مختلفة . وفى الغالب تعدل النظريات الأولى بحيث تفيد فى فهم كل من الظواهر الأصلية التى نشأت منها هذه المبادئ والظواهر الجديدة التى تطبق عليها هذه النظريات الآن .

والمبادئ الأساسية التى تلزم لوصف الظواهر الحرارية هى الحرارة ودرجة الحرارة . ولقد استغرق التمييز بين هذين المبدأين زمناً طويلا فى تاريخ العلم يصعب تصديقه ، ولكن سار التقدم بخطى واسعة بعد هذا التمييز . سنبحث هذين المبدأين ونوضح الفرق بينهما ، رغم أنهما الآن شيئان مألوفان لكل إنسان .

نستطيع بحاسة اللمس أن نميز الأجسام الساخنة والباردة . ولكن هذا اختبار نوعى فقط لا يكفى لوصف كمى ، بل انه يجلب الغموض فى بعض الأحيان ، ويمكن

ملاحظة ذلك بتجربة بسيطة مشهورة . نفرض أن لدينا ثلاثة أوانى تحتوى الأولى على ماء بارد والثانية على ماء فاتر والأخيرة على ماء ساخن . إذا غمسنا إحدى اليدين فى الماء البارد والأخرى فى الساخن فإننا نحصل على رسالة من الأولى تنبىء بالبرودة ورسالة من الثانية تنبىء بالسخونة إذا غمسنا بعد ذلك اليدين معا فى نفس الماء الفاتر فإننا نحصل على رسالتين متناقضتين واحدة من كل يد . لنفس السبب يكون رأى أحد رجال الاسكيمو فى جو نيويورك فى الربيع مختلفاً عن رأى أحد سكان المناطق الحارة ، فالأول يعتقد أنه حار والثانى يظن أنه بارد . نتخلص من هذه المشكلات بواسطة الترمومتر وهو آلة صممها جاليليو فى صورة بدائية . هنا أيضاً يقابلنا هذا الإسم المشهور ! ويعتمد استعمال الترمومتر على بعض الفروض الطبيعية الواضحة التى نتذكرها باقتباس أسطر قليلة من محاضرات ألقاها بلاك منذ أكثر من مائة وخمسين عاما ، وبلاك هو الرجل الذى ساهم بمجهود كبير فى التغلب على الصعوبات المتعلقة بفكرتى الحرارة ودرجتها .

« إذا أخذنا ألفاً أو أكثر من أنواع المادة المختلفة مثل المعادن والأحجار والأملاح والريش والصوف والماء وغيره من الموائع ، وكانت هذه الأشياء ذات حرارات مختلفة مبدئياً ، ثم وضعناها جميعاً فى حجرة واحدة لا توجد فيها مدفأة ولا تدخلها الشمس فإن الحرارة تنتقل من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة وقد يستغرق ذلك مدة ساعات أو يوم ، وإذا استعملنا ترمومتراً فى نهاية هذه الفترة ووضعناه على كل من هذه الأجسام فإنه يشير دائماً إلى نفس الدرجة .

وحسب التسمية الحديثة يلزم تغيير الجملة ذات حرارات مختلفة إلى ذات درجات حرارة مختلفة .

وقد يفكر الطبيب الذى يأخذ الترمومتر من فم رجل مريض كما يأتى : يبين الترمومتر درجة حرارة نفسه بواسطة طول عموده الزئبقى . سنفرض أن طول عمود الزئبق يزداد بالتناسب مع زيادة درجة الحرارة ؛ ولكن الترمومتر يبقى ملامساً للمريض الذى أعالجه عدة دقائق ، فتكون درجة حرارة الترمومتر هى نفس درجة

حرارة المريض . وعلى ذلك استنتج أن درجة حرارة هذا المريض هى التى يسجلها الترمومتر وربما كان الطبيب يعمل بطريقة ميكانيكية ولكنه فى الواقع يطبق نظريات طبيعية دون أن يفكر فيها .

ولكن هل يحتوى الترمومتر على نفس مقدار الحرارة الموجودة فى جسم الرجل ؟ طبعا لا . إن اقتراحنا أن الجسمين يحتويان على نفس الكمية من الحرارة نتيجة لتساوى درجتى حرارتهما يكون ، كما أشار بلاك :

« رأياً متسرعا فى الموضوع » ومعنى ذلك أننا نمزج بين كمية الحرارة الموجودة فى جسم وبين شدة هذه الحرارة رغم وضوح أنهما شيئان مختلفان يجب التمييز بينهما عند التفكير فى توزيع الحرارة .

يمكننا فهم هذا التمييز بواسطة تجربة بسيطة للغاية . إذا وضعنا رطلا من الماء فوق لهب الغاز فإن درجة حرارته تتغير من درجة حرارة الحجرة إلى درجة الغليان بعد فترة معينة من الزمن . وإذا استبدلنا هذا الرطل باثنى عشر رطلا من الماء أو أكثر ووضعناها فى نفس الإناء وفوق نفس اللهب فإنها تستغرق وقتا أطول بكثير من الفترة السابقة لكى تصل إلى درجة الغليان . هذه التجربة تبين أنه يلزم فى الحالة الأخيرة كمية أكبر من « شىء ما » ويسمى هذا « الشىء » حرارة .

ونحصل على مبدء آخر ، الحرارة النوعية ، من التجربة الآتية : إذ احتوى إناء على رطل من الماء وإناء آخر على رطل من الزئبق وسخن الإناءان بنفس الطريقة فإننا نلاحظ أن الزئبق يسخن بسرعة تفوق بكثير السرعة التى يسخن بها الماء أى أن « الحرارة » اللازمة لرفع درجة حرارة الزئبق درجة واحدة أقل من الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الماء درجة واحدة أيضا وعلى العموم تلزم كميات مختلفة من « الحرارة » لتغير درجة حرارة الكتل المتساوية من المواد المختلفة (مثل الماء والزئبق والحديد والنحاس والخشب الخ) ، درجة واحدة (من ٤٠ إلى ٤١ فهرنهيت مثلا) . ونعبر عن ذلك فنقول أن لكل مادة سعتها الحرارية أو حرارتها النوعية الخاصة بها .

مادمنا قد توصلنا إلى فهم فكرة الحرارة ، فإنه يمكننا أن نبحث فى طبيعتها بالتفصيل لدينا جسمان الأول ساخن والآخر بارد ، أو بعبارة أخرى درجة حرارة الأول أعلى من درجة حرارة الثانى . نزيل جميع المؤثرات الخارجية ونجعل هذين الجسمين يتلامسان . نعلم أن الجسمين يصلان إلى نفس درجة الحرارة بعد مضى فترة من الزمن . ولكن كيف يتم ذلك ؟ ماذا يحدث بين اللحظة التى يبدأ فيها التلامس بينهما وبين اللحظة التى تتساوى فيها درجتا الحرارة ؟ يمكننا أن نتصور أن الحرارة « تنساب » من جسم لآخر كما ينساب الماء من مستو مرتفع إلى مستو منخفض . ورغم بساطة هذه الفكرة فإنها تتفق مع كثير من الحقائق ، ويكون التناظر كما يأتى :

الماء	الحرارة
المستوى المرتفع	درجة الحرارة العالية
المستوى المنخفض	درجة الحرارة المنخفضة

ويستمر الانسياب إلى أن يصبح الارتفاعان ، أى درجتى الحرارة ، متساويين ويمكن بالبحث الكمى الاستفادة من وجهة النظر البدائية هذه . إذ خلطت كتلة معينة من الماء ذات درجة حرارة معلومة بكتلة أخرى معينة من الكحول فى درجة حرارة أخرى (لاتساوى درجة حرارة الماء) فمن الممكن الحصول على درجة الحرارة النهائية للمخلوط إذا علمت الحرارةالنوعية لكل من الماء والكحول وبالعكس ، إذا علمت درجة حرارة المخلوط النهائية يمكن بعد قليل من العمليات الجبرية الحصول على النسبة بين الحرارتين النوعيتين .

تتبين وجود أوجه شبه بين المبادىء المتعلقة بالحرارة التى ندرسها الآن وبين المبادىء الطبيعية الأخرى . فالحرارة من وجهة نظرنا هى جسم سيال كالكتلة فى الميكانيكا . وقد تتغير كمية الحرارة أو قد تبقى ثابتة ، مثل المال يمكن إنفاقه كما يمكن حفظه فى خزانة وكما أن مقدار المال الموجود فى خزانة لايتغير مادامت هذه الخزانة مقفلة فإن مقدار كل من الكتلة والحرارة فى جسم معزول يبقى ثابتا . وزجاجة

الترموس المثالية تناظر هذه الخزانة . وزيادة على ذلك ، لايضيع شيئا من الحرارة حتى لو انسابت من جسم لآخر مثلها فى ذلك مثل كتلة مجموعة منعزلة لاتتغير حتى ولو عانت تحويلا كيميائيا . وحتى لو استعملت الحرارة فى إذابة الثلج مثلا أو فى تحويل الماء إلى بخار بدلا من استعمالها فى رفع درجة حرارة جسم فإننا نستمر فى التفكير على أنها جسم سيال وأن من الممكن الحصول عليها ثانية بأكلها بتحويل الماء إلى ثلج أو بتحويل البخار إلى ماء والأسماء القديمة مثل حرارة الانصهار الكامنة ، حرارة التبخير الكامنة ، تبين أن هذه الأسس نشأت من التفكير فى الحرارة كشىء ذى كيان والحرارة الكامنة هى حرارة مختفية مؤقتاً مثل المال المحفوظ فى خزينة الذى يمكن الحصول عليه واستعماله إذا علمت كيفية فتح الخزينة .

ولكن من المؤكد أن كيان الحرارة يختلف عن كيان الكتلة . يمكننا أن نستدل على الكتل بواسطة الموازين ، ولكن هل للحرارة وزن ؟ هل يكون وزن قطعة حديد ساخنة إلى درجة الاحمرار أكبر من وزنها وهى باردة كالثلج ؟ تدلنا التجربة على أن قطعة الحديد لها نفس الوزن فى الحالتين . إذا كانت الحرارة شيئاً فإنه شىء لا وزن له ، وقد جرت العادة فى الماضى على تسمية الحرارة « كالوريك[1] » وهى أول ماعرف من مجموعة الأشياء التى لا وزن لها . وستسنح لنا فرصة فيما بعد لكى نتتبع تاريخ هذه المجموعة ودراسة كيفية ظهورها وتلاشيها . ونكتفى الآن بملاحظة مولد هذا العضو الخاص من هذه المجموعة .

الغرض من أية نظرية طبيعية هو تفسير أكبر مدى ممكن من الظواهر ، ويبرر وجود نظرية ما مقدرتها على تفسير الحوادث وجعلها مفهومة . لقد رأينا أن نظرية السيال للحرارة تفسر كثيراً من الظواهر الحرارية ، ومع ذلك سيظهر فى القريب العاجل أن هذا ليس إلا دليلا زائفاً ، وأن من المستحيل اعتبار الحرارة شيئاً سيالا حتى ولو كان هذا الشىء عديم الوزن . ويتضح ذلك من الرجوع إلى بعض التجارب البسيطة التى ميزت بدء الحضارة .

المادة لا يمكن الحصول عليها من اللاشىء ولا يمكن إضاعتها ، ولكن

(1). Caloric

الإنسان الأول ولد النار بالاحتكاك وأحرق بها الخشب . وأمثلة التسخين بواسطة الاحتكاك كثيرة جداً ومألوفة بدرجة تغنى عن ذكرها . فى جميع هذه الحالات تتولد كمية من الحرارة وهى حقيقة يصعب تعليلها بنظرية السيال ، وقد يحاول مؤيدو هذه النظرية تعليل هذه الظاهرة وقد تكون محاولتهم كما يأتى : « يمكن بواسطة نظرية السيال تفسير تولد هذه الحرارة . لنعتبر مثالا بسيطاً ، حالة دلك قطعة من الخشب بقطعة أخرى منه . الدلك هو شيء يؤثر فى الخشب ويغير خواصه ، ومن الجائز جداً أن تتعدل هذه الخواص بحيث تنتج درجة حرارة أعلى دون أن تتغير كمية الحرارة نفسها ، ونحن لا نشاهد إلا تغيراً فى درجة الحرارة . من الجائز أن الاحتكاك يغير الحرارة النوعية للخشب ولا يؤثر على كمية الحرارة الكلية » .

ولا توجد أية فائدة ترجى من مناقشة مؤيدى نظرية السيال فى هذه المرحلة ، وذلك لأنه لا يمكن حسم هذه المسألة إلا بالتجربة . نفرض أن قطعتين من الخشب متساويتان من جميع الوجوه ولنتصور أن تغيراً متساوياً قد اعترى درجة حرارتهما بطريقتين مختلفتين ؛ فى الأولى بالاحتكاك وفى الثانية بملامسة جسم ساخن مثلا . إذا كانت الحرارة النوعية لكل من قطعتى الخشب واحدة فى درجة الحرارة الجديدة فلا يوجد أى أساس لنظرية السيال . . هنالك طرق بسيطة للغاية لتعيين الحرارة النوعية ، ويتوقف مصير النظرية على نتيجة قياس الحرارتين النوعيتين السابقتين . وتتكرر الاختبارات التى تستطيع أن تصدر حكما بالحياة أو الموت على نظرية ما كثيراً فى تاريخ علم الطبيعة ، وهى تسمى تجارب حاسمة . والذى يقرر إذا كانت التجربة حاسمة أم لا هو صيغة السؤال نفسه ، ولا يمكن اختبار أكثر من نظرية واحدة بتجربة واحدة من هذا النوع . . والتجربة التى نعين فيها الحرارة النوعية لجسمين من نوع واحد وصلا إلى نفس درجة الحرارة الأول بالاحتكاك والثانى بانسياب الحرارة إليه من جسم آخر هى مثال على هذا النوع من التجارب الحاسمة . وقد أجرى رمفورد هذه التجربة منذ حوالى مائة وخمسون عاماً وبذلك قضى نهائياً على نظرية السيال للحرارة .

ويقص رمفورد قصته فيقول :

« كثيراً ما يحدث فى الحياة العملية العادية أن تسنح فرص لدراسة الأمور الطبيعية الغريبة ، وقد تُجرى كثير من التجارب الفلسفية المهمة دون مشقة أو تكاليف وذلك باستخدام الآلات التى صممت لاستعمالها فى الفنون والصناعات .

وكثيراً ما سنحت لى شخصياً الفرصة بمشاهدة ذلك ، وأنا مقتنع بأن الملاحظة الدقيقة لكل ما يجرى فى الحياة العملية تؤدى إلى أسئلة مفيدة وإلى طرق للبحث والتحسين أكثر من التى يحصل عليها الفلاسفة فى الساعات الطويلة المخصصة لدراساتهم المركزة ، وقد يظهر أننا نحصل على هذه النتائج بمجرد الصدفة أو نتيجة للتخيلات التى يتيه فيها العقل نتيجة لما اعتاد الإنسان مشاهدته .

وبينما كنت أشرف منذ فترة وجيزة على صناعة المدافع فى المصانع الحربية بميونيخ ، أثارت انتباهى درجة الحرارة العالية التى تصل إليها بندقية من البرونز فى وقت قصير أثناء خرها ، وأيضاً الحرارة الشديدة (أعلى بكثير جداً من درجة حرارة الماء المغلى كما وجدت بالتجربة) لشظايا المعدن المتطايرة منها بواسطة الثقاب .

من أين تأتى هذه الحرارة التى تظهر فى العملية الميكانيكية السابقة ؟

هل تنشأ من شظايا المعدن المنفصلة بواسطة الثقاب من كتلة المعدن الصلبة ؟ إذا كان هذا هو الواقع . فحسب النظرية الحديثة للحرارة الكامنة ونظرية السيال للحرارة يجب أن تتغير الحرارة النوعية ، ويجب أن يكون التغيير كبيراً بدرجة تعلل وجود كل هذه الحرارة .

والواقع أنه لم يحدث أى تغيير ، فقد أخذت كميتين متساويتين من هذه القطع المتطايرة ومن شرائح مصقولة من نفس كتلة المعدن بمنشار دقيق ورفعتها إلى درجة حرارة واحدة (درجة حرارة غليان الماء) ووضعتهما فى كميتين متساويتين من الماء البارد (درجة حرارته ٥٩½ ف) فلم نلاحظ أى اختلاف بين درجة حرارة الماء الذى وضعت فيه القطعة المتطايرة ودرجة حرارة الماء الذى وضعت فيه شرائح المعدن » .

وأخيراً وصل إلى النتيجة الآتية :

وعند البحث فى هذا الموضوع يجب أن نتذكر أن منبع الحرارة التى ظهرت بالاحتكاك فى التجارب السابقة يظهر كأن من المستحيل استنفاده . ومن الواضح أن الشيء الذى يمكن لجسم معزول ، أو لمجموعة منعزلة من الأجسام الاستمرار فى منحه دون حد لا يمكن أن يكون شيئاً مادياً . ويظهر لى أن من الصعب جداً إن لم يكن من المستحيل تكوين فكرة واضحة لأى شيء يمكن إيجاده ونقله بنفس الطريقة التى توجد وتنقل بها الحرارة فى هذه التجارب ، إلا إذا كان هذا الشيء هو الحركة » .

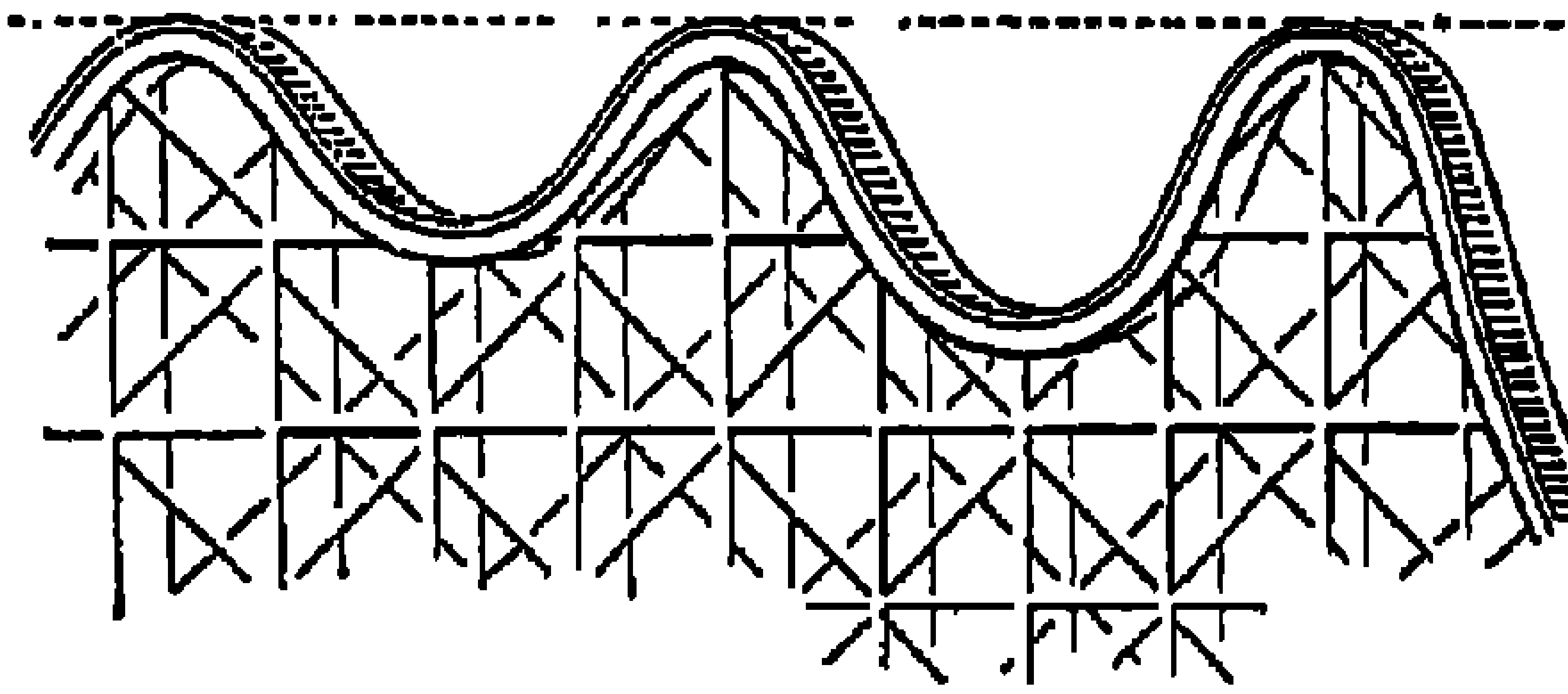
بذلك نرى انهيار النظرية القديمة ، أو بعبارة أدق نرى أن نظرية السيال لا يمكن تطبيقها إلا على مسائل انسياب الحرارة . ويجب علينا الآن (كما لاحظ رمفورد) أن نبحث عن دليل جديد .

من أجل ذلك سنترك موضوع الحرارة مؤقتاً ونعود إلى الميكانيكا . .

عربة الملاهى :

تعال بنا الآن نتتبع حركة تلك الملهاة الشعبية المسماة بـ « عربة الملاهى » . ترفع عربة صغيرة أو تدفع إلى أعلى موضع فى مسار متموج وعند تركها حرة تبدأ فى الدحرجة تحت تأثير قوة الجاذبية الأرضية فتأخذ فى الارتفاع والإنخفاض على خط منحنى شديد الإنحدار يتغير إتجاهه بكثرة ؛ ويجد الراكب فى ذلك لذة كبيرة نتيجة للتغيرات المفاجئة فى السرعة . وأثناء الحركة جميعها لا تصل العربة مطلقاً إلى نفس الارتفاع الإبتدائى ويصعب وصف الحركة وصفاً كاملا ، ففضلا عن الجانب الميكانيكى من المسألة ، أى التغير فى السرعة والموضع بمضى الزمن ، يوجد الاحتكاك الذى يولد الحرارة على القضبان والعجلات . والمغزى الوحيد لتقسيم هذه العملية الطبيعية إلى هاتين الوجهتين هو التمكن من استعمال المبادئ التى درسناها فيما سبق . ويؤدى هذا التقسيم إلى تجربة مثالية ، إذ أنه من الممكن أن نتخيل العملية الطبيعية التى لا يظهر فيها إلا الجانب الميكانيكى ولكن يستحيل تحقيقها عملياً .

للحصول على هذه التجربة المثالية ، نتصور أن أحد الأشخاص تمكن من التخلص تماماً من الاحتكاك الذى يصاحب الحركة باستمرار . وأن هذا الشخص قرر أن يطبق اكتشافه على تصميم « عربة ملاهى » . يجب أن يعلم هذا الشخص كيف يصمم مثل هذه العربة . ستسير العربة إلى أعلى وإلى أسفل مبتدئة من نقطة على ارتفاع مائة قدم عن سطح الأرض مثلا . يكتشف الرجل بعد وقت قصير من التجربة ومن الخطأ ، أنه يتحتم عليه اتباع قاعدة بسيطة للغاية . يستطيع أن يبنى الطريق كما يشاء بشرط أن تكون نقطة الابتداء هى أعلى نقطة فيه وإذا كانت العربة ستتحرك حركة حرة إلى نهاية المسار ، يمكن للمهندس أن يجعلها ترفع إلى مائة قدم أى عدد من المرات . ولكن يتحتم ألا تتعدى العربة هذا الارتفاع .



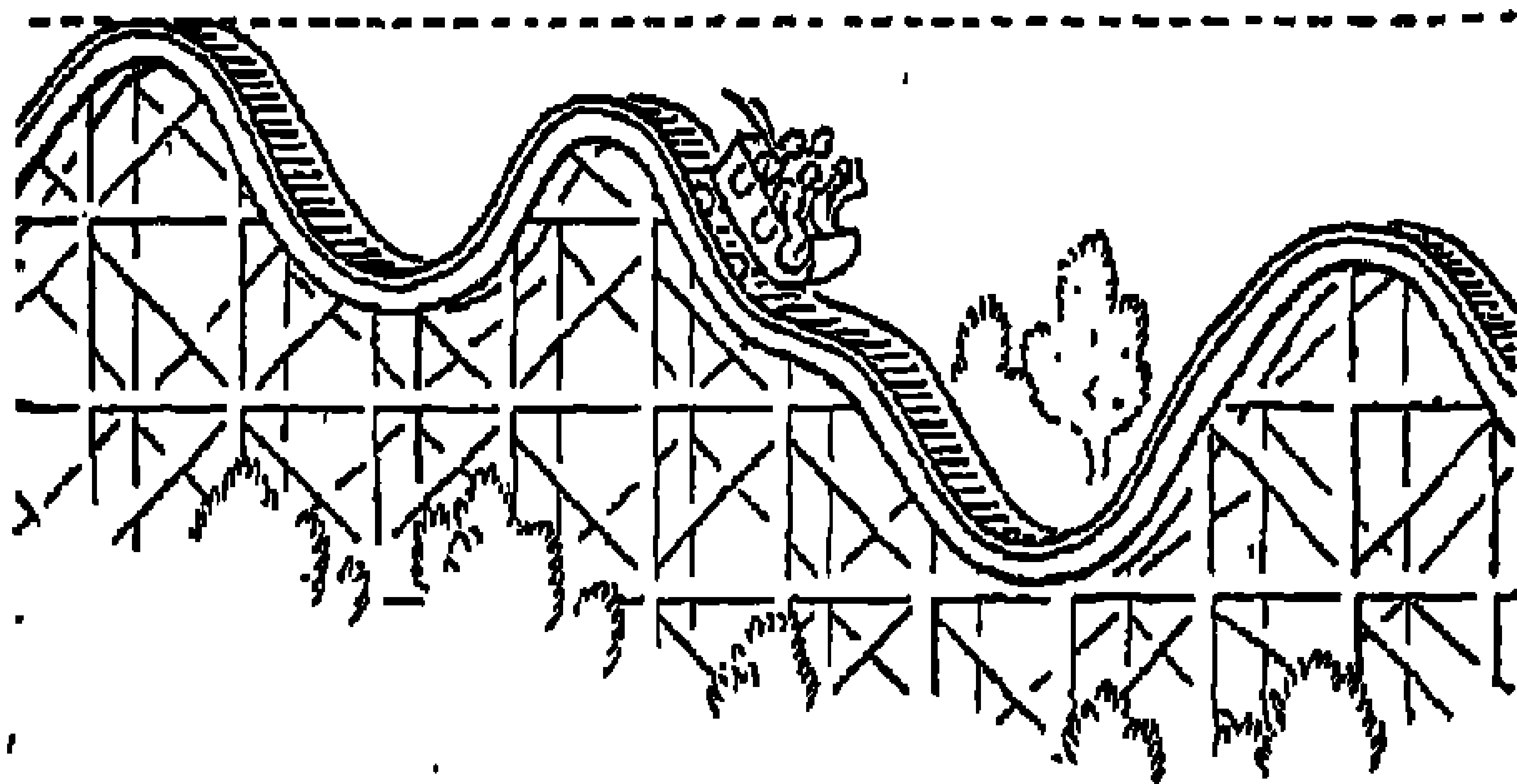
وفى المسار الحقيق يستحيل على العربة أن تصل إلى ارتفاعها الابتدائى وذلك لوجود الاحتكاك ؛ ولكن يمكن إهمال ذلك فى هذه التجربة المثالية .

تبدأ العربة فى التدحرج من النقطة الأصلية . ينقص ارتفاع العربة عن سطح الأرض كلما تحركت بينما تزداد سرعتها . وقد تذكرنا هذه الجملة الأخيرة لأول وهلة بجملة فى أحد دروس اللغة . « لا يوجد معى قلم ولكن يوجد معك ستة برتقالات» ولكن جملتنا ليست بهذه السخافة . لا توجد أية علاقة بين عدم وجود قلم معى وبين وجود ست برتقالات معك ، ولكن يوجد ارتباط واقعى بين ارتفاع العربة عن سطح الأرض وبين قيمة سرعتها . ويمكننا إيجاد قيمة سرعة العربة فى أية لحظة إذا علم ارتفاعها عن سطح الأرض ، ولكننا لن نتعرض لهذا الموضوع لطابعه الكمى ؛ وأفضل طريقة للتعبير عنه هى بواسطة القوانين الرياضية .

عند أعلى نقطة كانت سرعة العربة تساوى صفراً وكان ارتفاعها مائة قدم . وفى أسفل نقطة ممكنة يكون ارتفاعها عن الأرض صفراً وسرعتها نهاية عظمى . يمكن التعبير عن هذه الحقائق بطريقة أخرى . عند أعلى نقطة يكون للعربة « طاقة وضع » ولا يكون لها « طاقة حركة » وفى أسفل نقطة تكون « طاقة حركتها » نهاية عظمى « وطاقة وضعها » صفراً . وعند أى نقطة متوسطة حيث يكون للعربة ارتفاع وسرعة يكون لها طاقة حركة وطاقة وضع أيضاً . وتزداد طاقة الوضع بازدياد الارتفاع بينما تزداد طاقة الحركة بازدياد السرعة . وتكفى مبادىء الميكانيكا لشرح الحركة . ويحتوى الوصف الرياضى على تعبيرين للطاقة ، كل منهما يتغير رغم أن مجموعهما ثابت . وعلى ذلك يكون من الممكن إدخال فكرة طاقة الوضع التى تتوقف على الوضع وفكرة طاقة الحركة التى تعتمد على السرعة رياضياً وبطريقة مضبوطة . وإدخال هذين الإسمين اختيارى طبعاً وهو يتفق مع طبيعة هذين النوعين المختلفين من الطاقة . ويسمى مجموع هاتين الكميتين ، الذى يبقى ثابتاً ، أحد ثوابت الحركة .

ويمكن مقارنة الطاقة الكلية (طاقة الحركة وطاقة الوضع) مثلا بمبلغ ثابت من المال يتغير باستمرار من عملة لأخرى ، من دولارات إلى جنيهات مثلا ، وبالعكس حسب نظام تبادل معين .

وفى عربة الملاهى الحقيقية حيث يمنع احتكاك العربة من الوصول إلى ارتفاع نقطة الابتداء ، يوجد أيضاً تغير مستمر فى طاقتى الوضع والحركة . ولكن لا يبقى مجموع الطاقتين ثابتاً فى هذه الحالة ولكنه يأخذ فى التناقص .



تلزم الآن ، لربط الميكانيكا والحرارة ، خطوة أخرى جريئة هامة وسنرى فيما بعد كثير ، نتائج وتعميمات هذه الخطوة . .

لدينا الآن شيء آخر غير طاقتي الوضع والحركة وهو الحرارة التي يولدها الاحتكاك . هل تناظر هذه الحرارة التناقص في الطاقة الميكانيكية أي في طاقتي الوضع والحركة ؟ يبدو أن علينا أن نخمن تخميناً جديداً . إذا نظرنا إلى الحرارة كنوع من أنواع الطاقة ، فلعل مجموع هذه الأنواع الثلاث أي طاقة الوضع وطاقة الحركة والحرارة ، يظل ثابتاً . وليست الحرارة نفسها هي التي تشبه المادة في عدم تلاشيها ، ولكن الحرارة وأنواع الطاقة الأخرى مأخوذة معاً لا تتلاشى مطلقاً . يماثل ذلك حالة رجل يدفع لنفسه عمولة من الفرنكات عن تحويل دولارات إلى جنيهات بحيث يبقى مجموع الفرنكات والدولارات والجنيهات ثابتاً حسب نظام تحويل معين .

لقد حطم تقدم العلم النظرية القديمة التي تقول بأن الحرارة سيال ونحاول الآن الحصول على شيء آخر ، الطاقة ، تكون الحرارة إحدى صوره .

نظام التحويل :

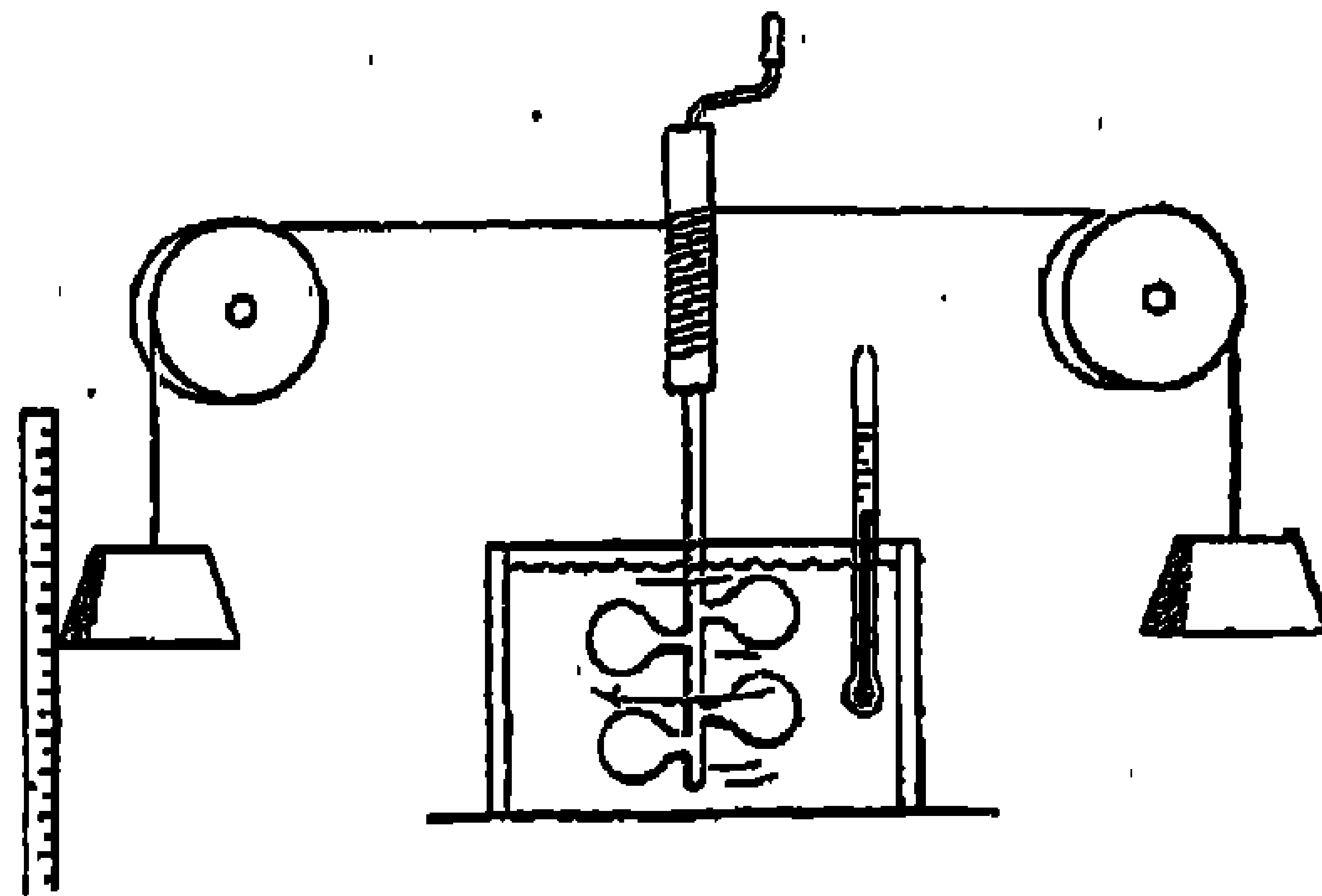
منذ أقل من مائة عام مضت ، خمن ماير الدليل الجديد الذي أدى إلى مبدأ اعتبار الحرارة كإحدى صور الطاقة . وقد حقق جول ذلك بالتجربة . من الصدف الغريبة أن أغلب الأبحاث الأساسية المتعلقة بطبيعة الحرارة قام بها رجال لم يحترفوا العلم بل كانوا ينظرون إلى علم الطبيعة على أنه هواية مفضلة فقط . فالاسكتلندي بلاك كان له أكثر من حرفة واحدة والألماني ماير كان طبيباً ، والكونت رمفورد الأمريكي الذي عاش في أوروبا فيما بعد ، كان مغامراً كبيراً وكان جم النشاط وقد أصبح في وقت من الأوقات وزيراً للحرب في باڤاريا . وهناك أيضاً الإنجليزي جول الذي كان يشتغل بإنتاج الخمور والذي أجرى في وقت فراغه بعض تجارب في غاية الأهمية تتعلق بقاعدة بقاء الطاقة .

لقد حقق جول بالتجربة أن الحرارة هي إحدى صور الطاقة كما عين نظام التحويل .

تكون طاقتا الوضع والحركة لمجموعة معينة الطاقة الميكانيكية للمجموعة ، وفى حالة عربة الملاهى جال بخاطرنا أن بعض الطاقة الميكانيكية يتحول إلى حرارة . إذا كان هذا صحيحاً فلا بد وأن يوجد فى هذه العملية وفى جميع العمليات المشابهة نظام معين للتحويل بين هذين النوعين من الطاقة . هذه مسألة رياضية ، ولكن إمكان تحويل كمية من الطاقة الميكانيكية إلى مقدار معين من الحرارة هو فى الواقع فى غاية الأهمية . نود أن نعلم العدد الذى يمثل نظام التحويل ، أى كمية الحرارة . التى نحصل عليها من مقدار معلوم من الطاقة الميكانيكية .

وكان غرض جول من إبحاثه هو تعيين هذا العدد . وتصميم إحدى تجاربه يشبه كثيراً تصميم ساعة الثقل . وعند ملأ مثل هذه الساعة يرفع ثقلان وبذلك تكتسب المجموعة طاقة وضع . وإذا لم تمس الساعة فإنه يمكن اعتبارها مجموعة مقفلة ولكن الثقلان يسقطان بالتدريج وتسير الساعة . وبعد فترة زمنية معينة يصل الثقلان إلى أسفل نقطة وتكون الساعة قد توقفت . ما الذى حدث للطاقة ؟ لقد تحولت طاقة وضع الثقلين إلى طاقة حركة للمجموعة ثم ضاعت بعد ذلك تدريجياً على هيئة حرارة .

وقد استطاع جول أن يقيس الحرارة المفقودة بجهاز من هذا النوع بعد تغييره تغييراً ينطوى على الذكاء . وبذلك تمكن جول من تعيين نظام التحويل ، والثقلان فى جهازه يجعلان عجلة بدالية تدور وهى مغموسة فى ماء . فتحول طاقة وضع



الثقلين إلى طاقة حركة للأجزاء القابلة للحركة ثم إلى حرارة ترفع درجة حرارة الماء . وقد قاس چول هذا التغير فى درجة الحرارة . وحيث أن حرارة الماء النوعية معلومة فقد تمكن بذلك من حساب كمية الحرارة التى استخدمت فى التسخين .

وقد لخص چول نتائج محاولات كثيرة كما يلى :

أولا : أن كمية الحرارة الناتجة عن احتكاك الأجسام الصلبة والسائلة يتناسب دائما مع مقدار القوة (يقصد الطاقة) المبذولة .

ثانيا : أن الحصول على كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل من الماء (موزون فى الفراغ ودرجة حرارته بين ٥٥ ، ٦٠) . درجة فرنهيتية واحدة يلزم بذل قوة (طاقة) ميكانيكية تمثل بسقوط ٧٧٢ رطلا مسافة قدم واحد .

وفى صيغة أخرى ، طاقة وضع ٧٧٢ رطل على ارتفاع قدم واحد من سطح الأرض تكافىء الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل من الماء من درجة حرارة ٥٥ ف إلى ٦٦ ف . ولقد أمكن الحصول على نتائج أدق لدرجة ما من التجارب التى أجريت بعد ذلك ولكن الهيكل الأساسى للمكافىء الميكانيكى للحرارة هو ماوجده چول فى عملة المدهش الأول .

ولقد سار التقدم سريعاً بعد الانتهاء من هذا العمل الهام . فلقد تبينا بعد ذلك أن الطاقة الميكانيكية والحرارة هما صورتان من صور الطاقة العديدة . وكل شىء يمكن تحويله إلى إحدى هاتين الصورتين هو أيضا إحدى صور الطاقة . الاشعاع الناتج عن الشمس طاقة لأن جزءا منه يتحول إلى حرارة على الأرض . للتيار الكهربائى طاقة لأنه قد يسخن سلكا أو قد يدير عجلات محرك . والفحم يمثل الطاقة الكيميائية التى تتحرر على هيئة حرارة عندما يحترق الفحم . وفى كل حدث من أحداث الطبيعية تتحول إحدى صور الطاقة إلى صورة أخرى حسب قانون تحويل معين دائما . وفى حالة مجموعة مقفلة ، أى مجموعة معزولة عن جميع المؤثرات الخارجية تبقى الطاقة محفوظة وبذلك تكون خواصها مشابهة لخواص المادة . ويكون مجموع جميع الأنواع المختلفة للطاقة فى هذه المجموعة ثابتا رغم أنه من الممكن أن يتغير

مقدار أى نوع واحد منها . وإذا أعتبرنا الـكون جميعه كمجموعة مقفلة يمكننا أن نعلن بفخار مع علماء الطبيعة فى القرن التاسع عشر أن طاقة الـكون ثابتة لاتتغير وأن من المستحيل استحداث أى جزء منها أو إضاعته .

ونستطيع إذن أن نميز بين نوعين من الموجودات . المادة كما نعرفها والطاقة . كل من هذين النوعين يتبع قوانين احتفاظ بالذات ، فمن المستحيل أن تتغير الـكتلة الـكلية أو الطاقة الـكلية لمجموعة معزولة . المادة لها وزن والطاقة لاوزن لها . أى أن لدينا نوعين مختلفين من الموجودات ، وقانونى بقاء .

هل ظلت هذه الآراء صحيحة إلى الآن ؟ أم هل تغيرت هذه الصورة — التى تبدو كأنها ذات أساس متين — فى ضوء تطورات أحدث ؟ فى الواقع أنها تغيرت !

وترتبط التغيرات فى هذه المبادىء بالنظرية النسبية وسنعود إلى هذه النقطة فيما بعد .

الأساس الفلسفى :

تؤدى نتائج البحث العلمى فى كثير من الأحيان إلى تغيير فى النظرة الفلسفية لمسائل تمتد إلى أبعد من مجال العلم الضيق . ماهو هدف العلم ؟ ماهو المطلوب من نظرية تحاول وصف الـكون ؟ رغم أن هذه الأسئلة تتعدى حدود علم الطبيعة ، فإن لها علاقة قوية به وذلك لأن العلم هو السبب فى نشأتها . يجب أن تعمم النتائج العلمية فلسفيا . وإذا كون هذا التعميم وقبل على نطاق واسع فإنه يؤدى فى كثير من الأحيان إلى تطورات أخرى فى التفـكير العلمى وذلك لأنه يبين أحد الطرق الـكثيرة التى يمكن سلوكها . وتؤدى الثورات الناجحة على المبادىء المسلم بها إلى تطورات مختلفة تماما وغير منتظرة . وتصبح هذه التطورات الجديدة منبعا لوجهات نظر فلسفية جديدة . ستبدو هذه الملاحظات غامضة وغير ضرورية إلى أن توضحها بأمثلة من تاريخ علم الطبيعة .

سنحاول هنا وصف الأفـكار الفلسفية الأولى عن غرض العلم . لقد كان لهذه الأفـكار تأثير قوى على تطور علم الطبيعة إلى أن ظهرت أدلة جديدة (بعد حوالى

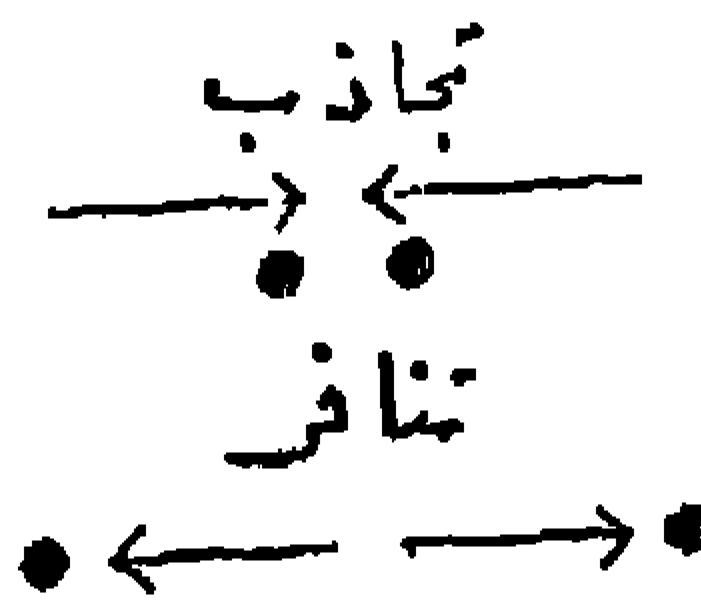
بمائة عام) وحقائق ونظريات جديدة كونت أساساً جديداً للعلم وحتمت ترك المبادىء القديمـــة .

والذى يبحث فى تاريخ العلم كله ، من الفلسفة الإغريقية إلى علم الطبيعة الحديث يجد أن المحاولات كانت مستمرة لاختصار تعقد الظواهر الطبيعة إلى بعض المبادىء والعلاقات الأساسية البسيطة . وهذا هو أساس كل الفلسفة الطبيعية ويبدو هذا واضحاً حتى فى عمل علماء الذرة . ومنذ ثلاثة وعشرون قرنا كتب ديموقراط :

« أنها لمسألة اتفاق أن نقول أن شيئا حلوا أومرا أو ساخنا أو بارداً أوذولون معين . أما فى الحقيقة فتوجد ذرات وفراغ أى أن الأشياء التى تشعر بوجودها بحواسنا ليست حقيقة كما تعودنا أن نعتبرها . الذرات والفراغ هما الشيئان الحقيقيان فقط » .

وتبقى هذه الفكرة فى الفلسفة القديمة تصوراً عبقرياً لاغير . فالاغريق لم يكونوا يعلمون قوانين الطبيعة التى تربط الحوادث المتتابعة . ولم يبدأ العلم الذى يربط بين النظرية والتجربة فعلا إلا منذ جاليلو . لقد تتبعنا الأدله الأولى التى أدت إلى قوانين الحركة . لقد بقيت القوة والمادة الفكرتان الأساسيتان لجميع المحاولات التى بذلت لفهم السكون فى مائتى عام من البحث العلمى . ويستحيل أن نتصور إحدى هاتين الفكرتين بدون الأخرى ، لأن المادة يظهر وجودها كمنبع للقوة بتأثيرها على مادة أخرى .

فلنعتبر الآن أبسط الأمثلة . نقطتان ماديتان وقوى تؤثر بينهما ، وأسهل القوى فى التخيل هى قوى الجذب والطرد . وفى كلتا هاتين الحالتين يقع متجه القوة على المستقيم الواصل بين النقطتين الماديتين . ويؤدى تبسيط الموضوع إلى حالة نقطتين ماديتين



كل منها تجذب أو تطرد الأخرى ، إذ أن أى فرض آخر عن القوى المؤثرة يعطى صورة أكثر تعقيداً . هل يمكننا أن نفرض فرضاً بسيطا آخر عن طول متجهات القوة ؟ حتى إذا أردنا أن نتجنب الفروض الخاصة إلى حد كبير ، فإنه من الممكن

أن نقول : تتوقف القوة بين أى نقطتين ماديتين على البعد بينهما فقط ، مثل قوى الجاذبية . يبدو هذا بسيطاً . ويمكننا أن نتخيل قوى أكثر تعقيدا من ذلك مثل القوى التى تتوقف على البعد بين النقطتين الماديتين وأيضاً على سرعتيهما . وإذا أخذنا المادة والقوة كعقيدتين أساسيتين ، فان من الصعب تخيل فروض أبسط من القول بأن القوى تعمل فى المستقيم الواصل بين النقطتين بأنها تتوقف فقط على البعد بينهما ولكن هل من الممكن وصف جميع الظواهر الطبيعية بدلالة قوى من هذا النوع فقط . ؟

إن نتائج الميكانيكا العظيمة فى كل الفروع ، ونجاحها الباهر فى تطور علم الفلك وتطبيق مبادئها على مسائل مختلفة ليست لها صلة ظاهرة بالميكانيكا قد ساعدت على الاعتقاد بإمكان اختصار جميع الظواهر الطبيعية إلى قوى بسيطة تعمل بين أشياء لاتتغير . وتظهر هذه المحاولة ، سواء كانت مقصودة أم لا ، فى جميع الاكتشافات العلمية التى حدثت فى القرنين اللذين تليا عهد جاليليو . وقد ذكر هلمهولتز ذلك بوضوح فى حوالى منتصف القرن التاسع عشر : « وإذن نكتشف أخيراً أن مشكلة علم الطبيعة المادى هى أن نرجع بالظواهر الطبيعية ثانية إلى قوى جاذبة وطاردة لاتتغير ولا تتوقف شدتها إلا على البعد . ويتوقف فهم الكون على حل هذه المسألة » .

أى أنه حسب رأى هلمهولتز يكون اتجاه تطور العالم محدداً وطريقه معينا .

« وستنتهى رسالته بمجرد أن يتم اختزال الظواهر الأساسية إلى قوى بسيطة وبمجرد أن نثبت أن هذا هو الاختزال الوحيد الممكن لهذه الظواهر » .

تظهر هذه الفكرة كأنها بدائية وسخيفة بالنسبة إلى عالم طبيعة فى القرن العشرين فما يخيفه أن يتصور أن من الممكن الانتهاء من مغامرات البحث الكبرى والحصول على صورة ثابتة للكون لا تتغير بمرور الزمن ولا تثير الاهتمام إن لم تكن خاطئة .

ورغم أن هذه المبادىء تختصر وصف جميع الحوادث إلى قوى بسيطة ، فإنها لا تحدد

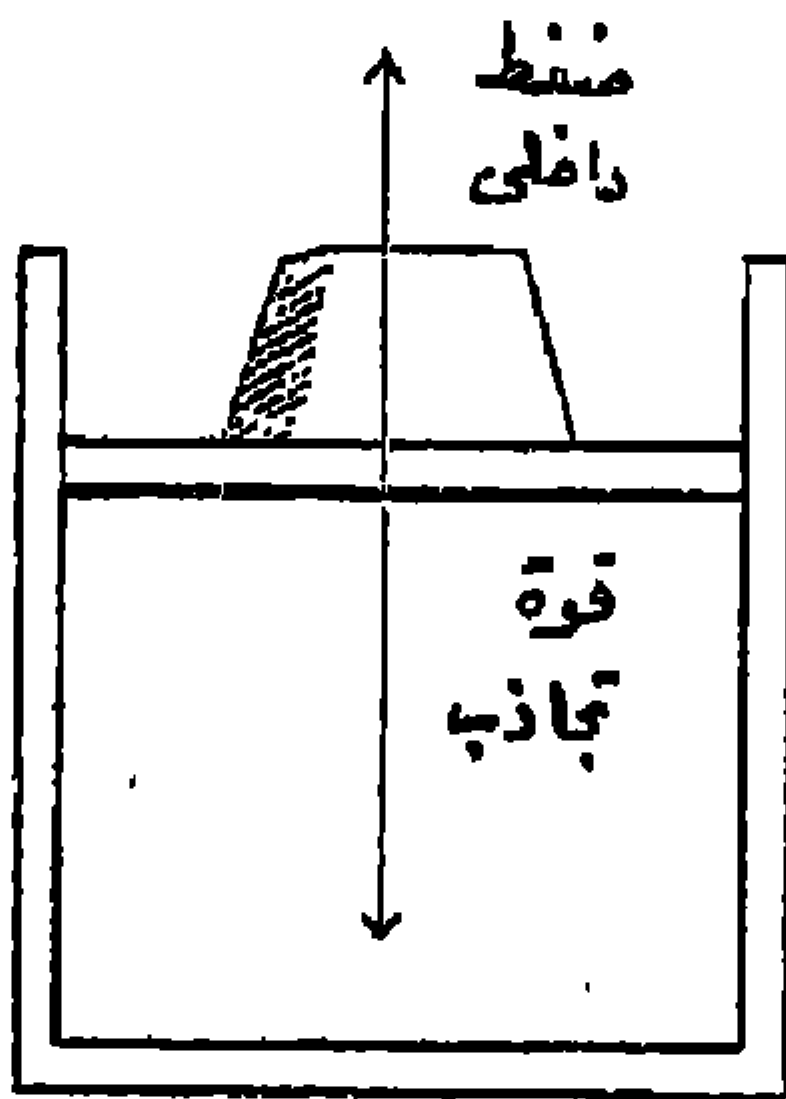
العلاقة بين القوى وبين البعد . ومن الممكن أن تختلف هذه العلاقة باختلاف الظواهر الطبيعية . وطبعا يكون إدخال أنواع مختلفة من القوى للاحداث المختلفة غيرمناسب من وجهة النظر الفلسفية . ومع ذلك فإن هذا الرأى ، المسمى « وجهة النظر الميكانيكية » الذى صاغه هلمهولتز بوضوح ، قدلعب دوراً هاما فى وقته . وتكوين نظرية الحركة للمادة هو أحد النتائج الهامة للاتجاه الميكانيكى . وقبل أن نشاهد زوال هذا الاتجاه ، فلنوافق مؤقتا على وجهة نظر علماء القرن الماضى ونرى ماذا يمكن استخلاصه من الصورة التى رسموها للعالم الخارجى .

نظرية الحركة للحرارة :

هل من الممكن تفسير ظاهرة الحرارة بدلالة حركة جسيمات تتفاعل بقوى بسيطة ؟ نفرض أن لدينا وعاءاً مقفلا يحوى كتلة معينة من غاز ، الهواء مثلا ، فى درجة حرارة معينة ، بالتسخين ترتفع درجة الحرارة وبذلك تزداد الطاقة . ولكن ماهى علاقة هذه الحرارة بالحركة ؟ إن الذى يجعلنا نعتقد فى وجود علاقة بين الحرارة والحركة شيئان ، الأولى وجهة النظر الفلسفية التجريبية المعترف بها والثانى هو تولد الحرارة بالحركة . إذا كانت جميع المسائل الموجودة فى الحياة مسائل ميكانيكية فلا بد وأن تكون الحرارة طاقة ميكانيكية . والغرض من نظرية الحركة هو التعبير عن المادة بهذه الطريقة . فحسب هذه النظرية نعتبر أى غاز كمجموعة كبيرة العدد من الجسيمات أو الجزيئات تتحرك فى جميع الاتجاهات وتتصادم مع بعضها وتغير اتجاه حركتها بعد التصادم . ويجب أن توجد قيمة متوسطة لسرعة الجزئيات كما يوجد سن متوسط أو ثروة متوسطة لمجتمع إنسانى كبير . أى أن هناك طاقة حركة متوسطة لكل جزىء . وإزدياد الحرارة فى الوعاء يعنى زيادة متوسط طاقة الحركة . وحسب هذه الصورة لا تكون الحرارة نوعا خاصا من الطاقة يختلف عن الطاقة الميكانيكية وإنما هى طاقة حركة الجزيئات . ويناظر كل درجة حرارة معينة متوسط معين لطاقة الحركة لكل جزىء . والواقع أن هذا ليس فرضاً اختيارياً . إذا أردنا تكوين صورة ميكانيكية متماسكة للمادة فإنه يتحتم علينا أن نأخذ طاقة حركة الجزىء كمقياس لدرجة حرارة الغاز .

وهذه النظرية ليست إحدى تخيلات العقل فقط . فمن الممكن البرهنة على اتفاق نظرية الحركة للغازات مع التجربة وعلى أنها تؤدى فعلا إلى فهم أعمق للحقائق . ويمكن توضيح ذلك بأمثلة قليلة .

لدينا وعاء مغلق بمكبس يمكنه (أى المكبس) أن يتحرك بحرية . ويحتوى الوعاء على مقدار معين من غاز محفوظ فى درجة حرارة ثابتة . إذا كان المكبس ساكناً عند الابتداء فيمكننا أن نحركه إلى أعلى وإلى أسفل بتقليل أو زيادة الثقل الموضوع عليه . ولدفع المكبس إلى أسفل يلزم استعمال قوة تعمل ضد الضغط الداخلى للغاز . ما هى طريقة عمل الضغط الداخلى حسب نظرية الحركة ؟ تتحرك الجزيئات ذات العدد الهائل التى يتركب منها الغاز فى جميع الاتجاهات ، وهى تدق السطوح والمكبس وترتد ثانية (مثل كرات مقذوفة على حائط) . وهذا الدق المستمر بعدد كبير من الجزيئات يحفظ المكبس على ارتفاع معين وذلك بمعادلة قوى الجاذبية التى تؤثر إلى أسفل على المكبس والأثقال . تؤثر قوة الجاذبية الثابتة فى الاتجاه الأول بينما يؤثر عدد كبير من القوى غير المنتظمة الناتجة من تصادم الجزيئات فى الاتجاه الآخر . إذن لكى يحدث التوازن لا بد وأن تكون محصلة هذا القوى غير المنتظمة مساوية لقوة الجاذبية .



نفرض أن المكبس دفع إلى أسفل وأن حجم الغاز نقص نتيجة لذلك إلى جزء كسرى من قيمته الأولى — نصفه مثلا — بينما تبقى درجة حرارته ثابتة . ماذا ننتظر أن يحدث حسب نظرية الحركة ؟ هل سيكون تأثير القوى الناتجة عن دق الجزيئات على المكبس أكبر أو أقل من تأثيرها السابق ؟ تقترب الجزيئات الآن من بعضها بدرجة أكبر منها أولا . ورغم أن قيمة متوسط طاقة الحركة تبقى كما هى فإن عدد مرات تصادم الجزيئات مع المكبس يزداد (فى نفس الفترة الزمنية) وبذلك تكون القوة الكلية أكبر . واضح من هذه الصورة التى ترسمها نظرية الحركة أنه يلزم وضع ثقل آخر

لكي يبقى المكبس متزناً في هذا الوضع المنخفض الجديد . هذه الحقيقة العملية البسيطة مألوفة تماماً ولكن يمكن الحصول عليها منطقياً من نظرية الحركة للمادة .

وهنالك تجربة أخرى : خذ وعاءين يحتويان على حجمين متساويين من غازين مختلفين الإيدروجين والنتروجين مثلا ، في درجة حرارة واحدة . افرض أن الوعاءين مغلقان بمكبسين متماثلين تماماً وأن فوق كلا منهما ثقلا متساوياً . بالاختصار ، هذا يعني أن كلا من الغازين له نفس الحجم ونفس درجة الحرارة ونفس الضغط . حيث أن درجة الحرارة واحدة ؛ ينتج حسب النظرية أن متوسط طاقة الحركة عن الجزيء له نفس القيمة في الحالتين وحيث أن الضغطين متساويان ، فإن القوة الكلية الناتجة عن تصادم الجزيئات بالمكبس تكون لها نفس القيمة في الحالتين . في المتوسط ، يكون لكل جزيء نفس طاقة الحركة وحيث أن لكل من نفس الحجم ، فإنه يتحتم أن يكون عدد الجزيئات الموجودة في كل منهما واحداً رغم أن الغازين مختلفان كيميائياً . لهذه النتيجة أهمية كبرى في فهم كثير من الظواهر الكيميائية وهي تعني أن عدد الجزيئات في حجم معين عند درجة حرارة معينة وضغط معين هو شيء لا يختلف من غاز لغاز وإنما ذو قيمة واحدة لجميع الغازات . ومن المدهش حقاً أنه فضلا عن أن نظرية الحركة تؤدي إلى وجود هذا العدد فإنها تمكننا أيضاً من تعيينه . وسنعود إلى هذه النقطة في القريب العاجل .

تفسر نظرية الحركة للمادة كمياً ونوعياً قوانين الغازات كما وجدت بالتجربة . وفضلا عن ذلك فالنظرية لا تقتصر على الغازات ولكن نجاحها الباهر كان في هذا المجال .

تمكن إسالة الغاز بخفض درجة الحرارة . ومعنى إنخفاض درجة حرارة مادة هو نقص متوسط كمية حركة جزيئاتها . وعلى ذلك يتضح أن متوسط حركة جزيء سائل أقل من متوسط طاقة حركة جزيء الغاز المناظر .

ولقد أزيح الستار عن حركة الجزيئات في السوائل أول مرة عما يسمى

« حركة براون » وهى ظاهرة مدهشة . وبدون نظرية الحركة للمادة تظل هذه الظاهرة غامضة وغير مفهومة . وقد لاحظ عالم النبات براون هذه الظاهرة لأول مرة ولم تفسر إلا فى بداية القرن الحالى أى بعد ثمانين عاماً .

والجهاز الوحيد الذى يلزم لمشاهدة حركة « براون » هو الميكروسكوب ، وليس من الضرورى أن يكون الميكروسكوب المستعمل من نوع ممتاز .

وكان براون يشتغل على حبيبات نباتات معينة أى :

« جسيمات ذات حجم كبير بدرجة غير مألوفة ويتراوح طول الواحدة من $\frac{١}{٤٠٠٠}$ إلى $\frac{١}{٥٠٠٠}$ من البوصة . » كما يقول براون . ونقتبس مما كتبه براون :

« عند فحص هذه الجسيمات مغموسة فى الماء ، لاحظت أن كثيراً منهـا يتحرك . . . وبعد إعادة المشاهدة مرات عديدة اقتنعت بأن هذه الحركات لم تنشأ عن تيارات فى المائع ولا عن تبخره التدريجى وإنما ترجع إلى الجسيم نفسه » .

والذى لاحظه بروان هو الإثارة المستمرة للحبيبات عند ما تغمس فى الماء ، ويمكن رؤية ذلك بالميكروسكوب . وأنه لمنظر يؤثر فى النفس .

هل ترتبط هذه الظاهرة بنبات معين فقط ؟ أجاب براون على هذا السؤال بإعادة التجربة على نباتات مختلفة كثيرة ووجد أن جميع الحبيبات المختلفة تتحرك حركة مشابهة . وزيادة على ذلك وجد نفس هذا النوع من عدم الاستقرار لا فى جسيمات المواد العضوية فقط وإنمـا لجسيمات المواد غير العضوية أيضاً . وحتى قطعة صغيرة مطحونة من تمثال قديم حققت نفس الظاهرة .

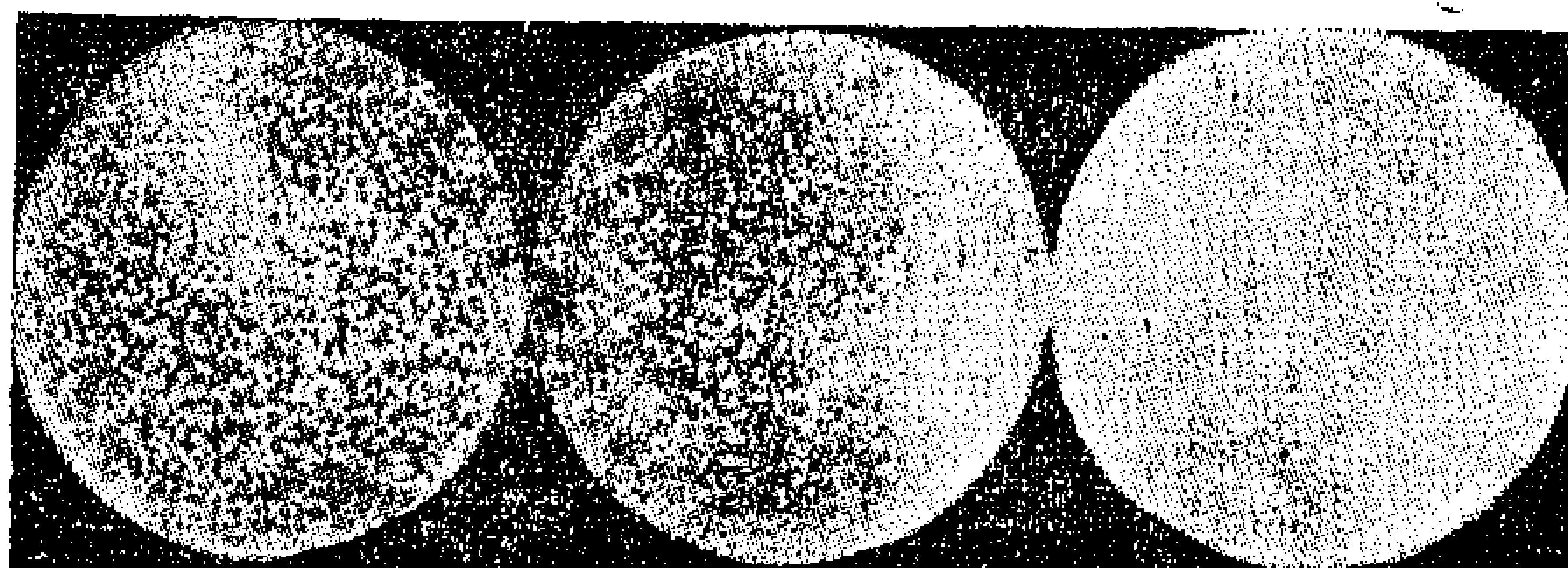
كيف تفسر هذه الحركة ؟ إنها تظهر كأنها تتعارض مع كل ما قبلناه فيما سبق . فملاحظة موضع جسيم معلوم واحد كل نصف دقيقة مثلا ، تزيح الستار عن مساره العجيب . والشىء الذى يكاد لا يصدق حقاً هو الصفة المستمرة الظاهرة للحركة . إذا وصفنا بندول يتأرجح فى ماء فإنه يسكن بعد فترة من الوقت إلا إذا أثرت عليه قوة خارجية أخرى . ووجود حركة مستمرة يبدو متعارضاً مع كل

التجارب السابقة . ونتغلب على هذه الصعوبة بطريقة مدهشة بتطبيق نظرية الحركة للمادة .

إذا استعملنا أقوى الميكروسكوبات التى فى حيازتنا ونظرنا إلى الماء فإنه يتعذر علينا رؤية الجزيئات أو حركاتها كما تصورها لنا نظرية الحركة للمادة . وعلى ذلك إذا كانت النظرية التى تنص على أن الماء هو مجموعة جزيئات صحيحة فلا بد وأن يكون حجم هذه الجزيئات أصغر من أصغر حجم يمكن رؤيته بأقوى الميكروسكوبات . بالرغم من ذلك دعنا نعتقد بصحتها وبأنها تعطينا صورة للحقيقة . إن جسيمات براون التى نراها إذا نظرنا بالميكروسكوب تتحرك مندفعة نتيجة لتسلط الجزيئات التى تكون الماء عليها رغم أن حجم هذه الجزيئات أصغر منها . وتنشأ حركة براون إذا كانت الجسيمات المندفعة صغيرة بدرجة كافية . وحركة هذه الجسيمات غير منتظمة لأن تسلط جزيئات السائل عليها غير منتظم ، ولا يمكن إيجاد قيمة متوسطة له نتيجة لعدم انتظامه فالحركة التى نشاهدها هى فى الواقع نتيجة للحركة التى يتعذر مشاهدتها . وخواص الجسيمات الكبيرة تعكس إلى حد ما خواص الجزيئات . ويمكن التعبير عن ذلك فى صيغة أخرى بأن نقول أن صفات الجسيمات هى صورة مكبرة لصفات الجزيئات بدرجة تجعل فى الإمكان ملاحظتها بالنظر فى الميكروسكوب ، وخواص مسار جسيم براون غير المنتظم (أى المسار) ، والذى لا يوجد ارتباط بينه وبين الزمن يدل على أن خواص مسارات الجزيئات الصغيرة التى تكون المادة ، تكون غير منتظمة أيضاً بطريقة مشابهة . وعلى ذلك نرى أن الدراسة الكمية لحركة براون تجعل نظرنا يصل إلى أطراف بعيدة من نظرية الحركة . من الواضح أن حركة براون التى نشاهدها تتوقف على حجم وكتلة الجزيئات المتسلطة . ولن تكون هناك حركة ما إذا لم يكن لهذه الجزئيات المتسلطة كمية معينة من الطاقة ، أى إذا لم يكن لها كتلة وسرعة ، لذلك لا ندهش إذا علمنا أن دراسة حركة براون قد تؤدى إلى تعيين كتلة الجزىء .

لقد تكونت نظرية الحركة كمياً لبحوث نظرية وعملية قاسية والدليل الذى ظهر نتيجة لحركة براون كان أحد الأدلة التى أدت إلى النتائج الكمية وتمكننا

اللوحة الأولى



(أخذ الصورة ف بيران)

جسيمات براون كما ترى خلال الميكروسكوب

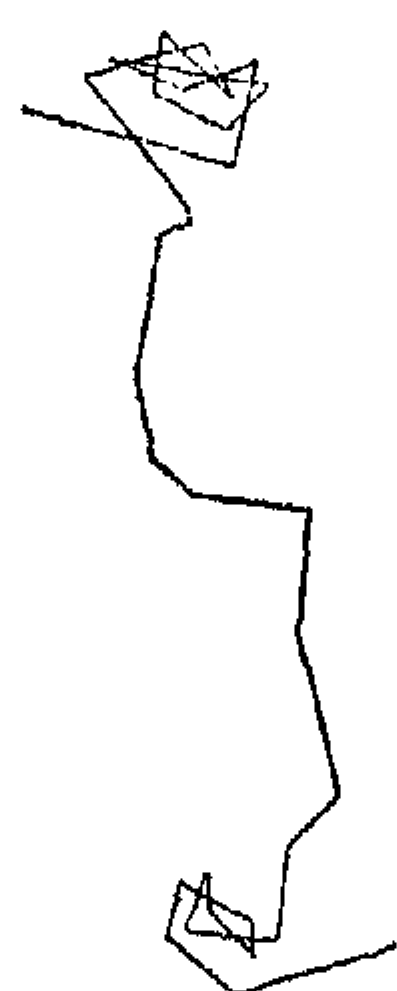


(أخذ الصورة برمبرج وڤاڤيلوف)

أحد جسيمات براون كما صور بتعريض وتغطية سطح



أوضاع متتالية لأحد جسيمات براون



المسار التقريبي مستنتجاً من هذه الأوضاع المتتالية

الحصول على نفس هذه النتائج بطرق مختلفة مبتدئين بأدلة أخرى مختلفة . وأنها لحقيقة ذات أهمية كبيرة أن كل هذه الطرق تؤيد نفس وجهه النظر وذلك لأنها توضح تماسك وتناسق نظرية الحركة للمادة .

سنذكر هنا واحدة فقط من هذه النتائج الكمية الكثيرة التى حصل عليها نظرياً وعملياً . نفرض أن لدينا جراماً من أخف العناصر وهو الايدروجين . ماهو عدد الجزئيات الموجودة فى هذا الجرام الواحد ؟ إن الاجابة على هذا السؤال لا تكون مميزة للأيدروجين وحده بل لجميع الغازات لأننا نعلم الشروط التى تحتها يحتوى غازين مختلفين على عدد واحد من الجزيئات .

تمكننا النظرية ، بعد الحصول على قياسات معينة تتعلق بحركة براون من الإجابة على هذا السؤال والجواب هو عدد كبير جداً بدرجة يصعب تصديقها . عدد الجزيئات الموجودة فى جرام من الأيدروجين هو

٣٠٣,٠٠٠,٠٠٠,٠٠٠,٠٠٠,٠٠٠,٠٠٠,٠٠٠,٠٠٠

تخيل أن حجم جزيئات الايدروجين قد كبر بدرجة تمكننا من رؤيتها بالميكروسكوب ، كأن يصبح قطر الجزىء مثلا ، قسما واحداً من خمسة آلاف قسم من البوصة أى مثل قطر جسيم براون . لحفظ هذه الجزيئات يلزمنا صندوق مكعب طول ضلعه يساوى ربع ميل !

يمكننا بسهولة أن نحسب كتلة أحد الجزيئات الايدروجين هذه ، وذلك بقسمة « ١ » على العدد المذكور فيما سبق . والجواب هو كمية صغيرة للغاية .

٠,٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠ ٣٣ جرام

والتجارب التى أجريت على حركة براون هى بعض التجارب المستقلة الكثيرة التى أدت إلى تعيين هذا العدد الذى يلعب دوراً هاماً للغاية فى علم الطبيعة .

ونلاحظ فى نظرية الحركة للمادة وفى جميع نتائجها تحقق المبدأ الفلسفى العام : جعل تفسير الظواهر يتوقف فقط على التفاعل بين جزيئات المادة .

ونلخص ما سبق كما يأتى

« فى الميكانيكا يمكن التنبأ بالمسار الذى سيرسمه جسم متحرك إذا علمنا حالته الراهنة والقوى التى تؤثر عليه . فمثلا يمكننا معرفة المسارات التى ستسير فيها جميع الكواكب فى المستقبل . والقوى الفعالة هى قوى نيوتن الجاذبة التى تتوقف على البعد فقط . والنتائج العظيمة للميكانيكا الكلاسيكية تقوى الاعتقاد بإمكان تطبيق وجهه النظر الميكانيكية باستمرار على جميع فروع علم الطبيعة وبأنه يمكن تفسير جميع الظواهر بدلالة قوى تمثل إما الجذب أو الطرد وتتوقف على البعد وتؤثر بين جسيمات لا تتغير .

فى نظرية الحركة للمادة ، نرى كيف أن هذا الاتجاه ، الذى نشأ من مسائل ميكانيكية ، يفسر ظاهرة الحرارة ويؤدى إلى رسم صورة ناجحة لتركيب المادة .

الباب الثانى

تداعى وجهة النظر الميكانيكية

[المائعان الكهربائيان — الموائع المغناطيسية — الصعوبة الجدية الأولى — سرعة الضوء — النظرية الجسيمية للضوء — لغز اللون — ماهى الموجة؟ — النظرية الموجية للضوء — هل موجات الضوء طولية أم مستعرضة — الأثير ووجهة النظر الميكانيكية] .

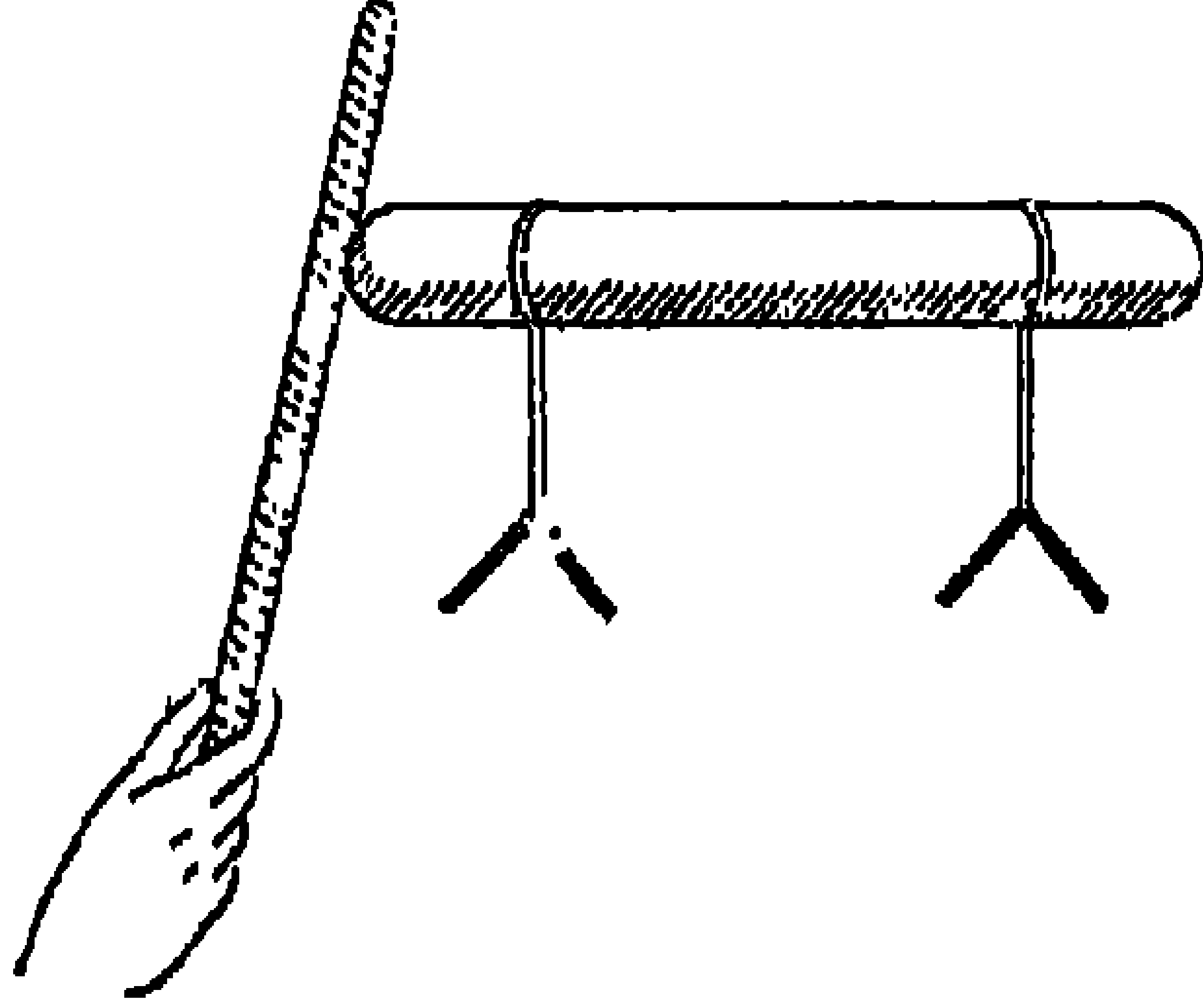
المائعان الكهربائيان :

تحتوى الصفحات التالية على وصف ممل لتجارب فى غاية البساطة، ممل لسببين الأول هو أن وصف التجارب ، دون إجرائها فعلا ، لايثير الاهتمام ، والثانى هو أن معنى هذه التجارب لن يتضح حتى تظهره النظرية التى ستصل إليها ، وغرضنا هو إعطاء مثال جيد يوضح الدور الذى تلعبه النظريات فى علم الطبيعة .

١ — قضيب معدنى محمول على قاعدة زجاجية ويتصل كل من طرفى القضيب بواسطة سلك بإلكتروسكوب . ماهو الاليكتروسكوب ؟ هو جهاز بسيط أجزاءه الرئيسية هى ورقتان ذهبيتان معلقتان فى نهاية قطعة معدنية قصيرة . والمجموعة محفوظة داخل إناء زجاجى بحيث لايمس المعدن إلا الأجسام غير المعدنية أو المواد العازلة كما تسمى . وفضلا عن الاليكتروسكوب والقضيب الزجاجى لدينا قضيب من المطاط الخشن . وقطعة من قماش الفانلة .

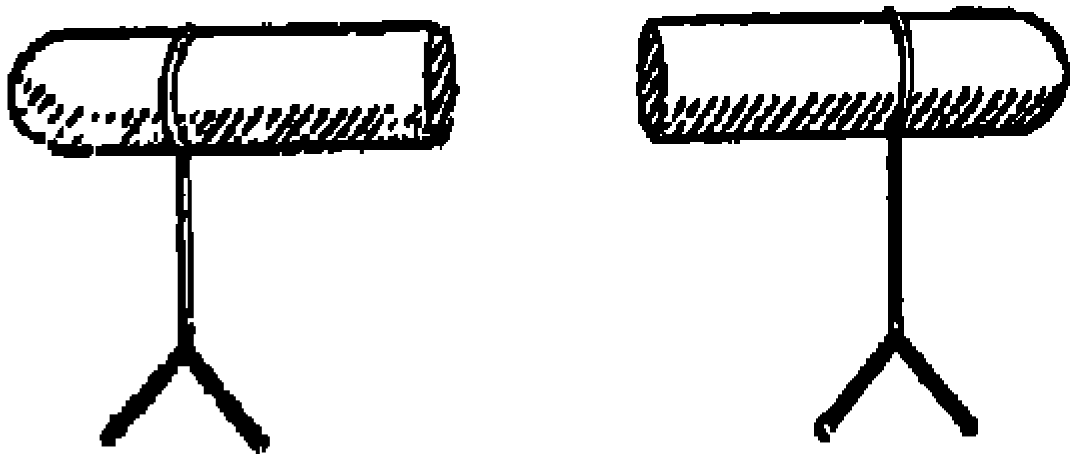
وتجرى التجربة كما يأتى — يتأكد أولا من أن ورقتى الذهب متقاربتان دون انفراج لأن هذا هو وضعهما العادى . إذا فرض أن الورقتين لم تكونا فى هذا الوضع . يمكن إعادتهما إلى الوضع العادى بلمس القضيب المعدنى . بعد القيام بهذه العمليات الأولية ندلك قضيب المطاط بشدة بواسطة قماش الفانلة . ثم نجعله يلامس

المعدن . فتنفرج الورقتان على الفور . وتبقى الورقتان منفرجتين . حتى بعد إبعاد قضيب المطاط .



٢ — تجرى تجربة أخرى باستعمال نفس الجهاز السابق بحيث تكون الورقتان منطبقتين عند بدء التجربة . فى هذه التجربة نجعل قضيب المطاط يقترب من المعدن دون أن يلامسه مرة أخرى فتنفرج الورقتان . وإذا أبعدنا قضيب المطاط عن المعدن دون أن يلمسه فإن الورقتين تنطبقان على الفور وتعودان إلى وضعهما العادى على عكس الحالة السابقة التى تبقى فيها الورقتان منفرجتان حتى بعد إبعاد قضيب المطاط .

٣ — فى التجربة الثالثة سنحدث تغيراً طفيفاً فى الجهاز — نفرض أن القضيب المعدنى يتكون من جزئين متصلين ببعضهما — ندلك قضيب المطاط بقماش الفانلة مرة أخرى ، ونقربه من المعدن . نشاهد نفس الظاهرة ، أى انفراج ورقتى الذهب نفصل الآن بين جزئى القضيب المعدنى . ثم نبعد قضيب المطاط . نلاحظ أن ورقتى الذهب تبقيان منفرجتين فى هذه الحالة بدلا من إنطباقهما كما فى التجربة الثانية



يصعب إثارة الاهتمام بهذه التجارب البسيطة الأوليه وربما كان الذى يجريها فى العصور الوسطى ينال التأنيب . وهى تبدو لنا مملة وغير منطقية . ويصعب إعادة هذه التجارب دون لبس بعد قراءة واحدة لهذا الوصف . وقد تفهم هذه التجارب لو علمنا شيئاً عن الموضوع . بل إنه يمكننا أن نقول أن احتمال إجراء مثل هذه التجارب دون فكرة سابقة محددة عن معناها هو احتمال بعيد للغاية .

سنبين الآن الفكرة الأساسية لنظرية بسيطة تفسر جميع الحقائق التي وصفناها فيما سبق .

يوجد مائعان كهربائيان يسمى أحدهما موجب (+) والآخر سالب (—) . وهما يشبهان لحد ما نظرية السيال التي سبق شرحها فكما في حالة الحرارة يبقى مقدار هذين المائعين في أية مجموعة معزولة ثابتا رغم ازدياده أو نقصه في أي فرد من أفراد هذه المجموعة . ولكن يوجد فرق أساسي بين هذه الحالة وبين حالة الحرارة أو المادة أو الطاقة . لدينا نوعان من السيال الكهربائي ولا يمكن هنا تشبيه الكهرباء بالعملة كما فعلنا فيما سبق إلا إذا عممنا هذا التشبيه بعض الشيء . يقال أن جسما متعادل كهربائيا إذا كان المائعان الكهربائيان (الموجب والسالب) يلاشي كل منهما الآخر بالضبط : وإذا كان شخص لا يملك شيئا فإما أن يكون هذا الشخص ليس لديه مال على الاطلاق وإما أن يكون المبلغ الذي يحفظه في خزانته يساوي تماما مجموع ما عليه من الديون ويمكننا مقارنة المبلغ الموجود في خزانة هذا الشخص بالمائع الكهربائي الموجب وديونه بالمائع الكهربائي السالب .

والفرض التالي في النظرية هو أن المائعين الكهربائيين اللذين من نوع واحد يتنافران (يطرد كل منهما الآخر) وإذا كانا من نوعين مختلفين فان كلا منهما يجذب الآخر . ويمكن تمثيل ذلك بالرسم كما يأتي .

ويبقى فرض نظري ضروري آخر : يوجد نوعان من الأجسام ، النوع الأول « الأجسام الموصلة للكهرباء » يمكن لهذين المائعين الحركة فيه بحرية ، والنوع الثاني « الأجسام العازلة للكهرباء » يتعذر على المائعين الحركة فيها .

ويجب ألا يفهم القارىء أن أي جسم هو إما عازل أو موصل . فالموصل والعازل المثاليان لا يوجدان إلا في الخيال ولا يمكن الحصول على أيهما فعلا . فالمعادن والأرض وجسم الإنسان كلها توصل الكهرباء ولكن ليس

بنفس الدرجة . والزجاج والمطاط والصينى وماماثلها تعزل الكهرباء . أما الهواء فهو يعزل الكهرباء بدرجة محدودة فقط كما يعلم أى شخص يشاهد التجارب التى وصفناها : وقد جرت العادة أن تعزى النتائج السيئة لتجارب الكهربائية الساكنة (التجارب الالكتروستاتيكية) إلى رطوبة الهواء وهو عذر جد مقبول .

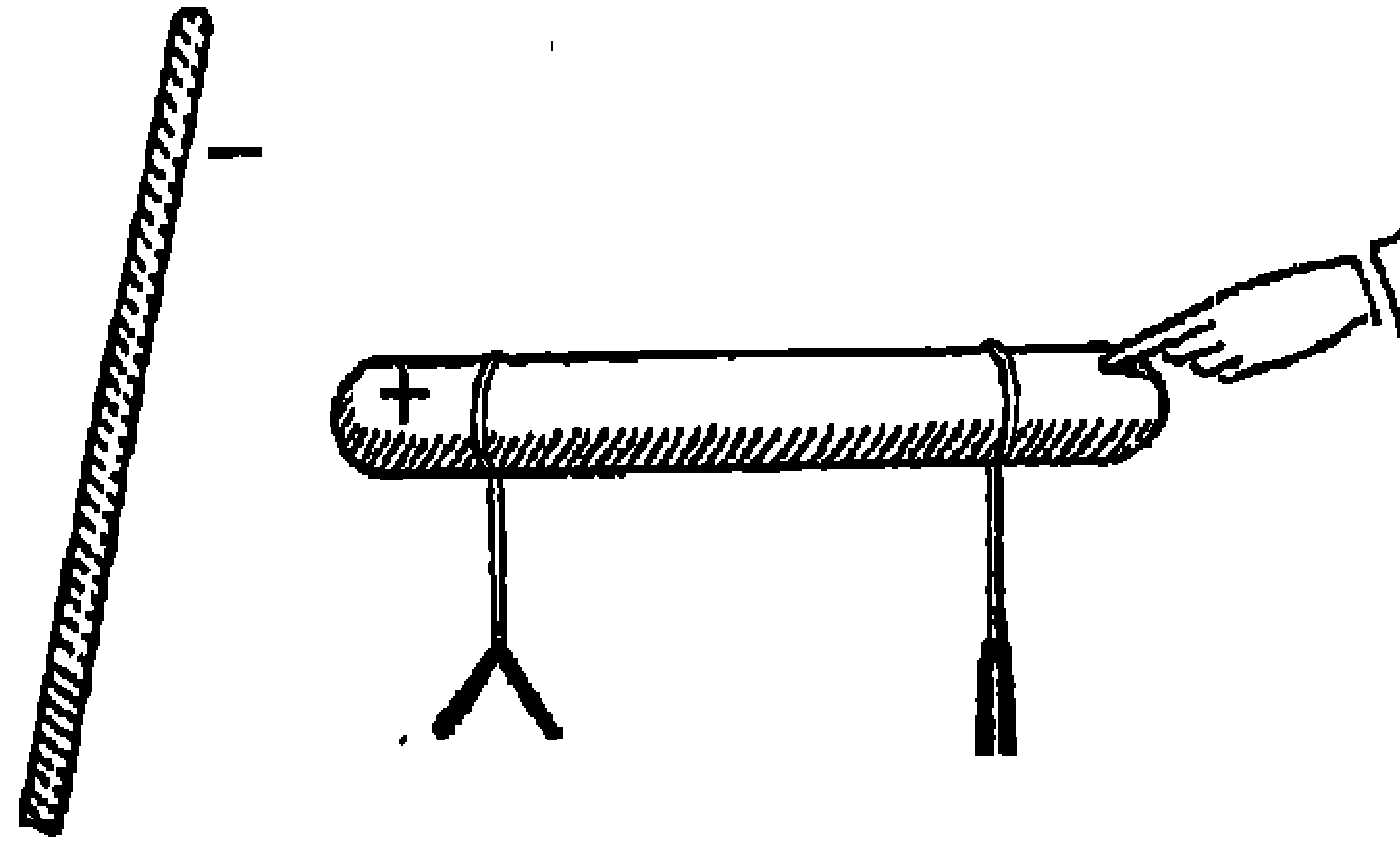
تكفى هذه الفروض النظرية لتفسير التجارب التى وصفناها .

١ — قضيب المطاط متعادل كهربائيا فى الظروف العادية مثله فى ذلك مثل جميع الأجسام الأخرى . وهو يحتوى على مقدارين متساويين من المائعين الموجب والسالب . وهذه العبارة اصطلاح محض لأننا نطبق فيها الأسماء التى أوجدتها النظرية لكى نتمكن من وصف عملية الدلك . ويسمى نوع الكهرباء الذى يزداد مقداره (عن مقدار النوع الآخر) فى قضيب المطاط بعد الدلك سالبا ، ومن المؤكد أيضاً أن هذا الاسم مسألة اتفاق فقط . وإذا دلكنا قضيبا من الزجاج بفراء قط ، فحسب ما اتفق عليه يكون نوع الكهرباء الزائد موجباً . لنبدأ الآن فى التجربة . نحضر مائعاً كهربائياً إلى المعدن وذلك بملاسته للمطاط . وفى المعدن يمكن للمائع الكهربائى أن يتحرك بحرية . وعلى ذلك فإنه ينتشر على سطح المعدن جميعه بما فيه الورقتان الذهبيتان . وحيث أن تأثير الكهرباء السالبة على الكهرباء السالبة هو التنافر فإن كلا من الورقتين تحاول أن تبتعد عن الأخرى أكبر مسافة ممكنة وتكون النتيجة هى الانفراج الذى نشاهده . وحيث أن المعدن يستند على زجاج أو أى عازل آخر ، فإن المائع يبقى على الموصل زمنا يطول أو يقصر على حسب — ما تسمح به درجة توصيل الهواء . نفهم الآن لماذا يتحتم لمس المعدن قبل البدء فى التجربة . ففى هذه الحالة يكون المعدن وجسم الإنسان والأرض موصلا واحداً هائلا ، وينتشر المائع الكهربائى على هذا الموصل الهائل ولا يبقى منه شىء يذكر على الالكتروسكوب .

٢ — تبدأ هذه التجربة مثل التجربة السابقة تماما . ولكن المطاط لا يمس المعدن بل يقترب منه فقط . وحيث أن المائعين الموجودين فى المعدن يمكنهما الحركة بحرية ، فإنهما يتفرقان ويجذب أحدهما بينما يطرد الآخر . ويمتزج المائعان مرة أخرى عندما يبعد قضيب المطاط وذلك لأن المائعين المختلفى النوع يجذب كل منهما الآخر .

٣ — فى هذه التجربة نفصل المعدن إلى قسمين وبعد ذلك نبعد قضيب المطاط فى هذه الحالة يتعذر على المائعين أن يمتزجا وعلى ذلك تحتفظ ورقتا الذهب بزيادة من أحد المائعين وتبقيان منفرجتين .

تبدو جميع الحقائق التى ذكرناها فيما سبق مفهومة فى ضوء هذه النظرية البسيطة . وتقوم هذه النظرية بأكثر من ذلك ، ففضلا عن الحقائق السابقة ، تمكننا النظرية من فهم حقائق أخرى كثيرة عن الكهرباء الساكنة . الغرض من أية نظرية جديدة هو أن تؤدى إلى اكتشاف ظواهر وقوانين جديدة ، ويتضح ذلك بمثال كالآتى : تصور تغييراً فى التجربة الثانية . افرض أن قضيب المطاط يبقى قريباً من المعدن وانك فى نفس الوقت تلمس الموصل باصبعك ، ماذا يحدث الآن ؟ وتجيب النظرية على ذلك بأنه يمكن للمائع المطرود (—) أن يهرب عن طريق جسمك وتكون النتيجة أن يبقى مائع واحد هو المائع الموجب . وأوراق



الالكتروسكوب القريبة من قضيب المطاط هى التى تبقى منفرجة ويمكن التحقق من ذلك بتجربة فعلية .

إذا نظرنا إلى هذه النظرية بمنظار علم الطبيعة الحديث، فمن المؤكد أننا سنجدها بسيطة بدائية وغير مرضية . وبالرغم من ذلك فهى مثال جيد يبين الخواص التى تميز كل نظرية طبيعية . ولا توجد نظريات دائمة فى العلم فبعض الحقائق التى تتنبأ بها نظرية ما كثيراً ما يثبت عدم صحتها بالتجربة . ولكل نظرية فترة معينة تنمو فيها تدريجياً وتزدهر ، وقد تتداعى بعد ذلك بسرعة . ونشأة وسقوط نظرية السيال

للحرارة هو أحد الأمثلة الكثيرة على ذلك . وسندرس أمثلة أخرى أكثر أهمية وعمقاً فيما بعد .

ويكاد ينشأ كل تقدم علمى عظيم من أزمة فى النظرية القديمة وذلك نتيجة للبحث عن مخرج من الصعوبات الموجودة . يجب أن نختبر المبادىء والنظريات القديمة رغم أنها تنتسب إلى الماضى ، لأن هـذا هو الطريق الوحيد لفهم أهمية ومدى صحة المبادىء والنظريات الجديدة .

فى الصفحات الأولى من هذا الكتاب ، قارنا الدور الذى يقوم به الباحث بعمل المخبر البوليسى الذى يجد الحل الصحيح بالتفكير البحت بعد أن يجمع الحقائق الضرورية . ولـكن هذا التشبيه سطحى فقط ولا أساس له . ففى كل من الحياة الواقعية ، والقصص البوليسية تكون الجريمة معروفة . وعلى المخبر البوليسى أن يبحث عن خطابات وبصمات أصابع ورصاص ومسدسات . . ولكنه يعلم تماماً أن جريمة قد ارتكبت . أما حالة العالم فليست كذلك ، وليس من الصعب أن نتخيل شخصاً لا يعلم شيئاً على الاطلاق عن الكهرباء ، فقد عاش أجدادنا حياتهم دون أن يعلموعنها شيئاً . لنفرض الآن أن فى حوزة هذا الشخص معدن وقضيب من المطاط وقطعة من قماش الفانلة وورقتان من الذهب وزجاجات . . وبالاختصار كل ما نحتاجه لإجراء التجارب الثلاث السابقة ، بالرغم من أن هذا الشخص ذو ثقافة عالية فإنه فى الغالب سيستعمل الزجاجات فى حفظ الخمر ، وقماش الفانلة فى التنظيف ولن يفكر مطلقاً فى عمل الأشياء التى وصفناها . أما فى حالة المخبر البوليسى فالجريمة معروفة ، أى أن المسألة مصاغة ! من الذى قتل محمد حسن ؟ ويجب على العالم نفسه أن يرتكب الجريمة إلى حد ما ، وأن يقوم بالبحث أيضا ، وزيادة على ذلك فإن مهمته ليست مقصورة على تفسير حالة واحدة معينة بل هى تفسير جميع الظواهر التى حدثت والتى قد تحدث فيما بعد .

فى المقدمة التى أعطيناها لتوضيح فكرة المائعين ؛ نرى بوضوح تأثير الفكرة الميكانيكية التى تحاول تفسير كل ظاهرة بدلالة المادة وبدلالة القوى البسيطة التى تعمل بينها ، وإذا أردنا أن نبين ما إذا كان من الممكن تطبيق وجهة النظر

الميكانيكية لوصف الظواهر الكهربائية ، فإنه يتحتم علينا دراسة المسألة الآتية : نفرض أن لدينا كرتين صغيرتين على كل منهما شحنة كهربائية ، أى أن على كل منهما زيادة معينة من أحد المائعين . نعلم أن الكرتين إما أن تتجاذبا أو تتنافرا . ولكن هل تتوقف القوة المؤثرة على البعد فقط ؟ وإذا كان الأمر كذلك فما هى العلاقة بين القوة والبعد ؟ يبدو أن أبسط تخمين ممكن هو أن العلاقة بين القوة بين القوة والبعد فى هذه الحالة هى نفس العلاقة بينهما فى حالة قوة الجاذبية التى فيها على سبيل المثال تنقص القوة إلى تسع قيمتها إذا ازداد البعد إلى ثلاثة أمثاله . لقد أثبت كولوم صحة هذا القانون بالتجارب التى أجراها . فبعد مائة عام من اكتشاف نيوتن لقانون الجاذبية وجد كولوم قانوناً مشابهاً يربط بين القوة الكهربائية والبعد ، ونقطتا الاختلاف الرئيسيتان بين قانونى نيوتن وكولوم هما :

(١) توجد قوى الجاذبية باستمرار بينما لا توجد القوى الكهربائية إلا إذا كان الجسمان مشحونين بالكهرباء .

(٢) فى حالة الجاذبية توجد قوة جاذبة فقط ولكن القوة الكهربائية قد تكون جاذبة أو طاردة .

ينشأ هنا نفس السؤال الذى درسناه فى حالة الحرارة : هل للمائعين الكهربائيين وزن أم لا ؟ أو بعبارة أخرى هل وزن قطعة معدنية وهى فى حالة التعادل يساوى وزنها وهى مشحونة بالكهرباء ؟ بواسطة الموازين الموجودة لدينا لا تتبين أى فرق فى الوزن فى هاتين الحالتين . وعلى ذلك نستنتج أن المائعين الكهربائيين سيالان لا وزن لهما .

يستلزم التقدم فى دراسة نظرية الكهرباء إدخال فكرتين جديدتين . ومرة أخرى سنتحاشى التعاريف المضبوطة ، مستخدمين بدلا منها طريقة المقارنة بالمبادىء التى نعرفها جيداً . ونحن نذكر أهمية التمييز بين كمية الحرارة ودرجاتها فى دراسة ظاهرة الحرارة . يعادل ذلك فى الأهمية ، التمييز بين الجهد الكهربائى والشحنة الكهربائية . ويتضح الفرق بين هاتين الفكرتين من التناظر الآتى :

الجهد الكهربائى	درجة الحرارة
الشحنة الكهربائية	الحرارة

فقد يحتوى موصلان ، كرتان مختلفتا الحجم مثلا ، على شحنتين كهربائيتين متساويتين (أى على زيادة متساوية من أحد المائعين) ولـكن جهدهما يختلف ويكون جهد الـكرة الصغرى أعلى من جهد الـكبرى . ستكون الـكثافة السطحية للمائع على الـكرة الصغرى أكبر منها على الـكرة الـكبرى . وحيث أن القوة الطاردة لا بد وأن تزداد بازدياد الـكثافة ، فإن الدرجة التى تميل بها الشحنة إلى الهروب تكون أكبر فى حالة الـكرة الصغرى منها فى حالة الـكرة الـكبرى . ويدل ميل الشحنة إلى ترك الموصل على جهد هذا الموصل ، ولـكى نبين بوضوح الفرق بين الشحنة والجهد سنصوغ بعض العبارات التى تصف خواص الأجسام الساخنة والعبارات المناظرة فى حالة الموصلات المشحونة بالـكهرباء .

الحرارة

إذا تلامس جسمان وكانت درجتا حرارتهما مختلفتين قبل التلامس فإنهما يصلان إلى نفس درجة الحرارة بعد فترة من الزمن .

إذا كان لدينـا جسمان مختلفان فى السعة الحرارية وأعطينا كلا منهما مقداراً متساوياً من الحرارة فإن التغير فى درجتى حرارتهما يكون مختلفاً .

إذا لامس ترمومتر جسما ، فإنه يبين بواسطة طول عموده الزئبقى درجة حرارة الترمومتر وبالتالى درجة حرارة الجسم .

الـكهرباء

إذا تلامس موصلان وكان جهداهما قبل التلامس مختلفين فإنهما يصلان إلى نفس الجهد بعد فترة زمنية قصيرة جداً .

إذا كان لدينـا جسمان مختلفان فى السعة الـكهربائية وأعطينا كلا منهما شحنة كهربائية متساوية فإن التغير فى جهديهما يكون مختلفا .

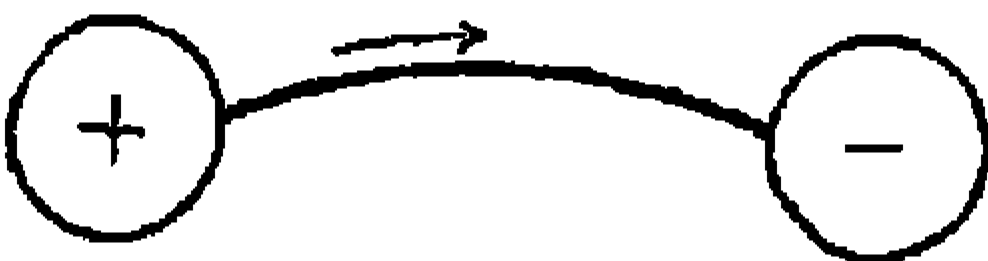
إذا اتصل الـكتروسكوب بموصل فإنه يبين بواسطة انفراج ورقتيه الذهبيتين جهد نفسه الـكهربائى وبالتالى الجهد الـكهربائى للموصل .

ولـكن يجب ألا نذهب بعيداً فى هذا التناظر . والمثال الآتى يبين وجود أوجه اختلاف وأوجه تشابه بين الحرارة والـكهرباء . إذا لامس جسم ساخن

جسما بارداً فإن الحرارة تسرى من الجسم الساخن إلى الجسم البارد . نفرض أن لدينا موصلين معزولين على كل منهما شحنة متساوية الأولى موجبة والثانية سالبة . جهدا الموصلين مختلفان . حسب ما اتفق عليه ، يكون جهد الموصل ذى الشحنة الموجبة أعلى من جهد الموصل ذى الشحنة السالبة . ولكن إذا وصل الموصلان بسلك فحسب نظرية المائعين الكهربائيين تتلاشى شحنة كليهما ، وعلى ذلك لا يوجد فرق فى الجهد الكهربائى على الإطلاق . يجب أن نتخيل « انسياب» الشحنة الكهربائية من أحد الموصلين إلى الآخر أثناء الفترة الزمنية القصيرة التى يتلاشى فيها فرق الجهد . ولكن كيف يكون ذلك ؟ هل ينساب المائع الموجب إلى الجسم السالب الشحنة ، أم المائع السالب إلى الجسم الموجب الشحنة .

المعلومات المذكورة هنا لا تمكننا من الجزم بأحد هذين الاحتمالين أو بأن الانسياب يحدث فى الاتجاهين فى نفس الوقت . والمسألة ليست إلا أمراً يتفق عليه ، ولا يوجد أى مغزى للاختيار لأنه لا توجد لدينا أية طريقة عملية للاجابة على هذا السؤال . وقد أجابت التطورات التالية ، التى أدت إلى نظرية أكثر تماسكا للكهرباء على هذا السؤال . وهذه الإجابة تبدو لا معنى لها على الإطلاق إذا صيغت بدلالة النظرية البسيطة الأولية ، أى نظرية المائعين الكهربائيين . وسنفترض هنا ما يأتى : ينساب المائع الكهربائى من الموصل ذو الجهد الأعلى إلى الموصل ذو الجهد الأدنى . وعلى ذلك ففى الحالة الخاصة التى ندرسها تسرى الكهرباء من الموجب إلى السالب . وهذا التعبير هو مسألة اتفاق فقط وحتى الآن هو اختيارى بحت .

وتبين هذه الصعوبة أن التناظر بين الحرارة الكهرباء ليس كاملا بأى حال من الأحوال.

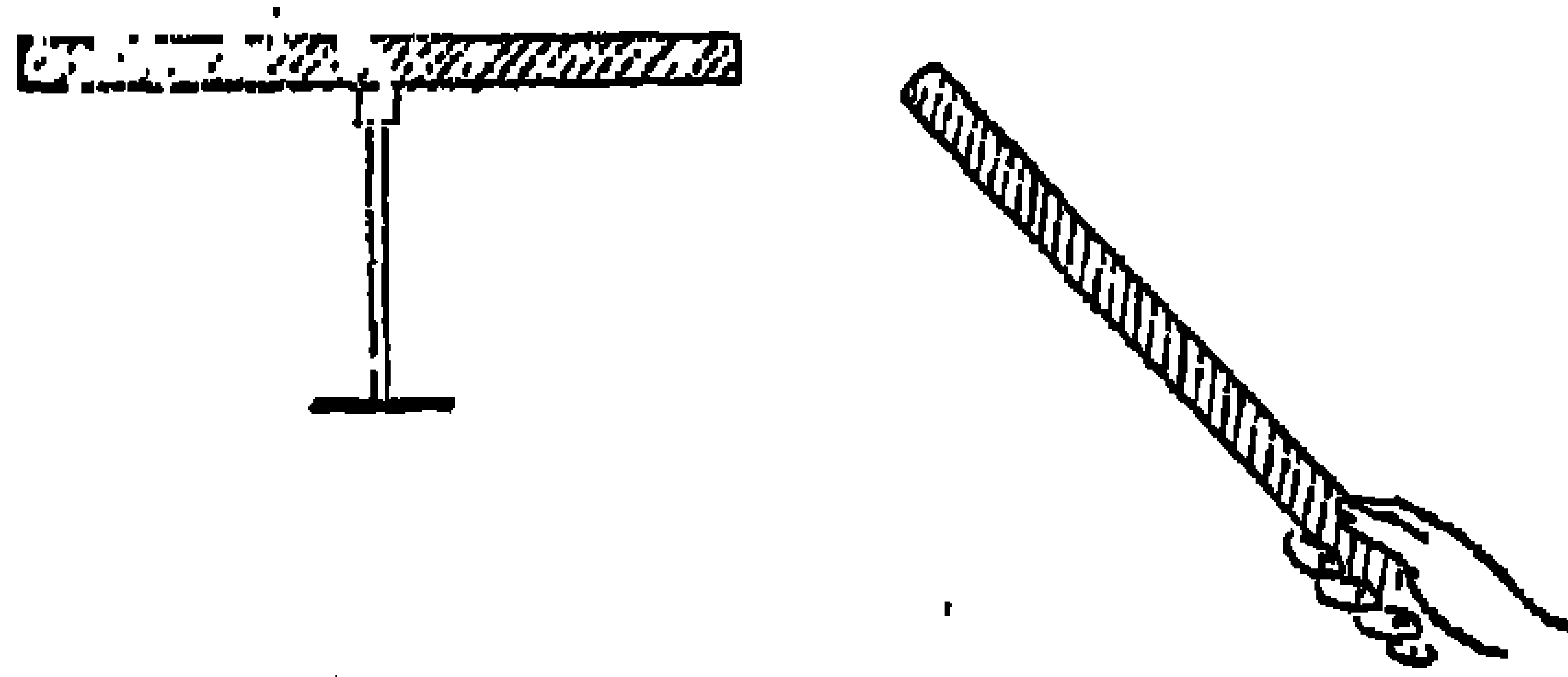


لقد رأينا إمكان تطبيق وجهة النظر الميكانيكية لوصف الحقائق الأولية فى الكهرباء الاستاتيكية . ونفس الشيء ممكن فى حالة الظواهر المغناطيسية .

الظواهر المغناطيسية :

سنسير هنا بنفس الطريقة السابقة ، فنبدأ بحقائق بسيطة للغاية ، ثم نبحث عن تفسيرها النظرى .

١ — لدينا قضيبان مغناطيسيان طويلان ، الأول يتحرك بسهولة فى مستو أفقى حول مركزه المثبت والآخر ممسوك باليد . نقرب طرفا القضيبين من بعضهما

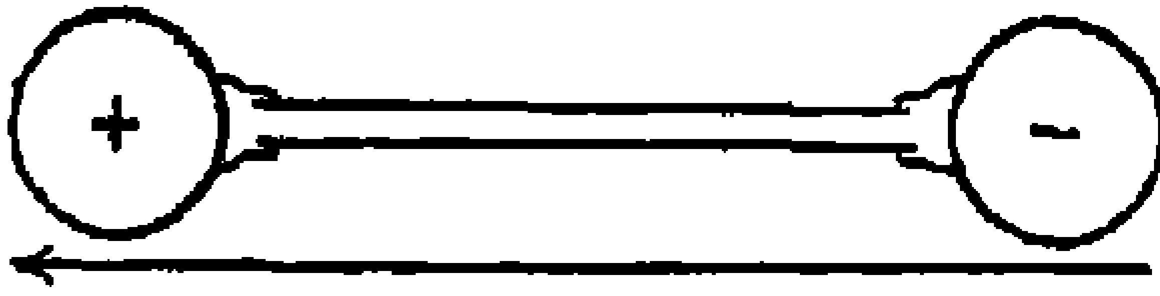


فنلاحظ قوة جاذبة شديدة بينهما . يمكن إجراء هذه التجربة دائماً . وإذا لم تلاحظ هذه القوة الجاذبية فحاول الطرف الآخر للقضيب الممسوك باليد ولا بد أن تلاحظ هذه الظاهرة السابقة إذا كان القضيبان ممغنطين . تسمى نهايتا القضيب قطبيه . لإكمال التجربة السابقة نحرك قضيب المغناطيس الممسوك باليد على المغناطيس الآخر . نلاحظ أن قوة الجذب تتناقص إلى أن يصل القضيب إلى منتصف هذا المغناطيس الأخير فلا تشعر بأية قوة جاذبة على الإطلاق . وإذا تحرك القضيب فى نفس الاتجاه فإننا نشعر بقوة طاردة تصل إلى نهايتها العظمى عند القطب الثانى للمغناطيس الأفقى .

٢ — تؤدى التجربة السابقة إلى تجربة أخرى . كل مغناطيس له قطبان . هل يمكن عزل أحدهما ؟ الفكرة فى غاية البساطة ، يكفى أن نكسر المغناطيس إلى جزئين متساويين . لقد رأينا أنه لا توجد قوة بين قطب المغناطيس الأول ومركز الثانى . ولكن النتيجة التى نحصل عليها من كسر المغناطيس غريبة وغير متوقعة . وإذا كررنا التجربة الأولى على أحد نصفى المغناطيس نحصل على نفس

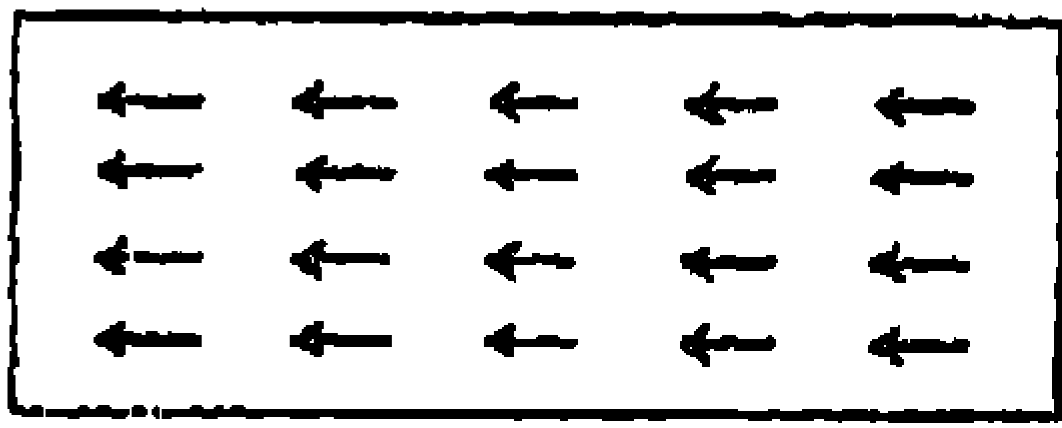
النتائج السابقة ! يوجد الآن قطب قوى فى الموضع الذى لم نلاحظ وجود أية قوة مغناطيسية عنده أولا .

كيف تفسر هذه الحقائق ؟ يمكننا أن نحاول وضع نظرية للمغناطيسية مشابهة لنظرية الكهرباء السابقة . وذلك لأن قوى الجذب والطرد تصاحب كلا من الظواهر المغناطيسية والكهربائية . نفرض أن لدينا موصلين كريين عليهما شحنتين كهربائيتين متساويتين فى القيمة المطلقة إحداهما موجبة والأخرى سالبة ، + ٥ ، — ٥ مثلا . نفرض أيضاً أن قضيباً عازلا من الزجاج مثلا ، يصل بين هاتين الكرتين . يمكن تمثيل هذه المجموعة بسهم متجه من الموصل ذو الشحنة السالبة إلى الموصل ذو الشحنة الموجبة . تسمى هذه المجموعة مزدوجاً كهربائياً . من الواضح أن مزدوجين كهربائيين من هذا النوع يسلكان نفس سلوك القضيبين المغناطيسين فى التجربة الأولى . وإذا نظرنا إلى هذه المجموعة على أنها تمثل مغناطيسياً حقيقياً فمن الممكن أن نقول (على فرض وجود المائعين المغناطيسيين) أن المغناطيس ماهو إلا مزدوج مغناطيسى له عند نهايتاه مائعان مغناطيسيان مختلفى النوع .



نستطيع بهذه النظرية البسيطة ، التى حصلنا عليها بتقليد نظرية الكهرباء ، أن نفسر نتائج التجربة الأولى نحصل من هذا التمثيل على قوة جاذبة عند أحد الطرفين وطاردة عن الآخر وعلى قوتين متساويتين ومتعادلتين عند الوسط . ولكن هل نستطيع تفسير نتائج التجربة الثانية أيضاً ؟ بكسر قضيب الزجاج (فى حالة المزدوج الكهربائى) نحصل على قطبين منعزلين . حسب النظرية الجديدة يجب أن نحصل على نفس النتيجة إذا كسرنا المغناطيس . ولكن النتائج التى حصلنا عليها من التجربة الثانية تخالف ذلك . يحتم علينا هذا التناقض أن نبحث عن نظرية أفضل . بدلا من النموذج السابق ، نتخيل أن المغناطيس مكون من مزدوجات مغناطيسية صغيرة جداً ولا يمكن تفرقة قطبى أى واحد منها بالكسر ، واتجاه جميع هذه المزدوجات واحد هو اتجاه المغناطيس . يتضح على الفور لماذا يسبب كسر

المغناطيس ظهور قطبين جديدين كما نرى أن هذه النظرية الجديدة توضح حقائق تجربتى ١ ، ٢ .



وتكفى النظرية الأولى ، دون إدخال أى تعديل عليها ، لتفسير كثير من الحقائق . فمثلا نعلم أن المغناطيس يجذب قطع الحديد ؛ لماذا ؟ فى قطعة الحديد العادية يكون المائعان المغناطيسيان ممتزجين وعلى ذلك لا يكون لها أى تأثير مغناطيسى ، وتقريب قطب موجب من قطعة الحديد يكون بمثابة « أمر بالتفريق » للمائعين ، فيجذب القطب الموجب مائع الحديد السالب ويطرد الموجب . وينتج عن ذلك قوة الجذب بين المغناطيس والحديد . وإذا أبعدنا المغناطيس يعود المائعان إلى حالة تقرب من حالتهم الأولى ، وتعتمد درجة اختلاف الحالتين على الدرجة التى يتذكر بها المائعان الصوت الآمر للقوة الخارجية أى على درجة تأثرهم بالمغناطيس .

ولن نتحدث إلا قليلا عن الجانب الكمى للموضوع . إذا كان لدينا قضيبان ممغنطان طويلان فإنه يمكننا بحث تجاذب (أو تنافر) قطبيهما عندما يقترب أحدهما من الآخر . وإذا كان القضيبان طويلين بدرجة كافية ، فإن تأثير القطبين البعيدين على بعضهما يكون صغيراً ويمكن إهماله . ماهى العلاقة بين قوة تجاذب أو تنافر القطبين وبين البعد بينهما ؟ لقد أجابت تجربة كولوم على هذا السؤال كما يأتى :

هذه العلاقة هى كما فى قانون الجاذبيـة لنيوتن وقانون كولوم للكهرباء الاستاتيكية .

نرى مرة أخرى فى هذه النظرية تطبيقاً لوجهة نظر عامة ، ألا وهى : الميل إلى وصف جميع الظواهر بدلالة قوى جاذبة وطاردة تتوقف فقط على البعد بين جسيمات ثابتة لا تتغير وتؤثر بينها .

وسنشير الآن إلى حقيقة ، معروفة تماما ، وذلك لأننا سنستعملها فيما بعد . وهى أن الأرض هى مزدوج مغناطيسى كبير . ولا يوجد أى شىء يفسر هذه الحقيقة . ويكاد

ينطبق قطبا الأرض الشمالى والجنوبى على قطبيها المغناطيسيين السالب والموجب على الترتيب . وطبعاً ، ليست الأسماء سالب وموجب إلا مسألة اتفاق . ولكن هذه التسمية بعد الاتفاق عليها تمكننا من التميز بين الأقطاب فى أية حالة أخرى . والابرة المغناطيسية التى تتحرك فى مستوافقى حول منتصفها تطيع أمر القوة المغناطيسية الأرضية . فقطبها الموجب يشير نحو قطب الأرض الشمالى أى قطبها المغناطيسى السالب.

ورغم أنه يمكننا تطبق وجهة النظر الميكانيكية باستمرار للظواهر المغناطيسية والكهربائية التى أشرنا إليها هنا فإنه لا يوجد مايدعو إلى الفخر أو السرور لذلك فمن المؤكد أن بعض نواحى النظرية غير مرضيه إن لم تكن غير مشجعة . فمن الضرورى للنظرية إيجاد أجسام سيالة جديدة هى المائعان الكهربائيان والمزدوجات المغناطيسية الأولية . لقد ازداد عدد الأجسام السيالة كثيراً ! .

والقوى التى ظهرت بسيطة ، ويمكن التعبير عن القوى المغناطيسية والكهربائية وقوى الجاذبية بنفس الطريقة . ولكننا ندفع ثمناً غاليا لهذه البساطة ألا وهو إدخال الأشياء السيالة الجديدة والعديمة الوزن . وليست هذه سوى صور مفتعلة وغير حقيقية ولا علاقة بينها وبين الأجسام الأصلية وهى المادة .

الصعوبة الجدية الأولى :

نحن الآن فى حالة تسمح بذكر الصعوبة الجدية الأولى التى نشأت عن تطبيق وجهة نظرنا الفلسفية العامة . وسنثبت فيما بعد أن هذه الصعوبة وأخرى أشد منها هما السبب فى تداعى الاعتقاد بامكان تفسير جميع الظواهر ميكانيكيا .

لقد بدأ التطور العظيم فى الكهرباء كفرع من فروع العلم والهندسة ، باكتشاف التيار الكهربائى . ونجد هنا إحدى اللحظات القلائل فى تاريخ العلم التى تلعب فيها الصدفة دوراً هاما . وتروى قصة قوة ساق الضفدعة بطرق مختلفة . وبغض النظر عن التفاصيل ، لايوجد أى شك فى أن اكتشاف جلفانى الذى حدث بالصدفة ، قاد فولتا إلى تصميم مايعرف ببطارية (عمود) فولتا . ولاتوجد لهذه البطارية أية فائدة عملية الآن ولكنها لاتزال تعطى مثالا بسيطا لمصدر تيار كهربائى فى التجارب

المدرسية وفى الكتب الدراسية . وفكرة تركيب هذه البطارية بسيطة ، توجد عدة مخبارات تحتوى على ماء مضاف إليه قليل من حامض الكبريتيك وفى كل مخبار توجد قطعتان معدنيتان الأولى من النحاس والثانية من الزنك مغموستان فى المحلول ويتصل لوح النحاس فى كل إناء بلوح الزنك فى الإناء التالى ؛ أى أن لوح الزنك فى الإناء الأول ولوح النحاس فى الإناء الأخير هما اللوحان الوحيدان غير المتصلان . يمكننا أن نستدل على وجود فرق فى الجهد الكهربائى بين نحاس الإناء الأول وزنك الإناء الأخير (وذلك باستخدام الكتروسكوب متوسط الحساسية) إذا كان عدد مكونات البطارية ، أى الأوعية التى يحتوى كل منها على لوحى الزنك والنحاس ، كبيراً بدرجة كافية .

لاتتميز بطارية فولتا المكونة من عدة عناصر عن أخرى مكونة من عنصر واحد إلا فى سهولة قياس الكميات المتعلقة بها وهذا هو السبب الوحيد الذى من أجله تكلمنا عن بطارية ذات عناصر كثيرة ، أما فيمايلى فعنصر واحد يكفى تماما . وجهد النحاس أعلى من جهد الزنك . واستعمال كلمة أعلى هنا يناظر استعمالها عندمانقول أن + ٢ أعلى (أكبر) من — ٢ . إذا اتصل موصل بلوح النحاس وآخر بالزنك فإن كلا من الموصلين يصبح مشحونا ؛ وتكون شحنة الأول موجبة وشحنة الثانى سالبة . حتى هذه النقطة لم يظهر بعد أى شيء جديد يستحق الملاحظة تقريبا ، ويمكننا محاولة تطبيق أفكارنا السابقة عن فرق الجهد . ولقد رأينا أن الفرق فى الجهد بين أى موصلين يتلاشى إذا وصلنا بينهما بسلك ، إذ بذلك ينساب مائع كهربائى من أحد الموصلين إلى الآخر . وكانت هذه العملية تشابه عملية تساوى درجتى الحرارة نتيجة لانسياب الحرارة . ولكن هل نحصل على نفس النتيجة فى حالة بطارية فولتا ؟ لقد كتب فولتا فى تقريره يقول أن اللوحين كانت بهما نفس صفات الموصلات .

« . . . . . . ضعيفا الشحنة يعملان بدون توقف أو أن شحنتيهما ترجع إلى قيمتها الأولى بعد كل تفريغ كهربائى أو بمعنى آخر ينتج عن هذا شحنة غير منتهية أو فعلا دائما ينتج عنه المائع الكهربائى » .

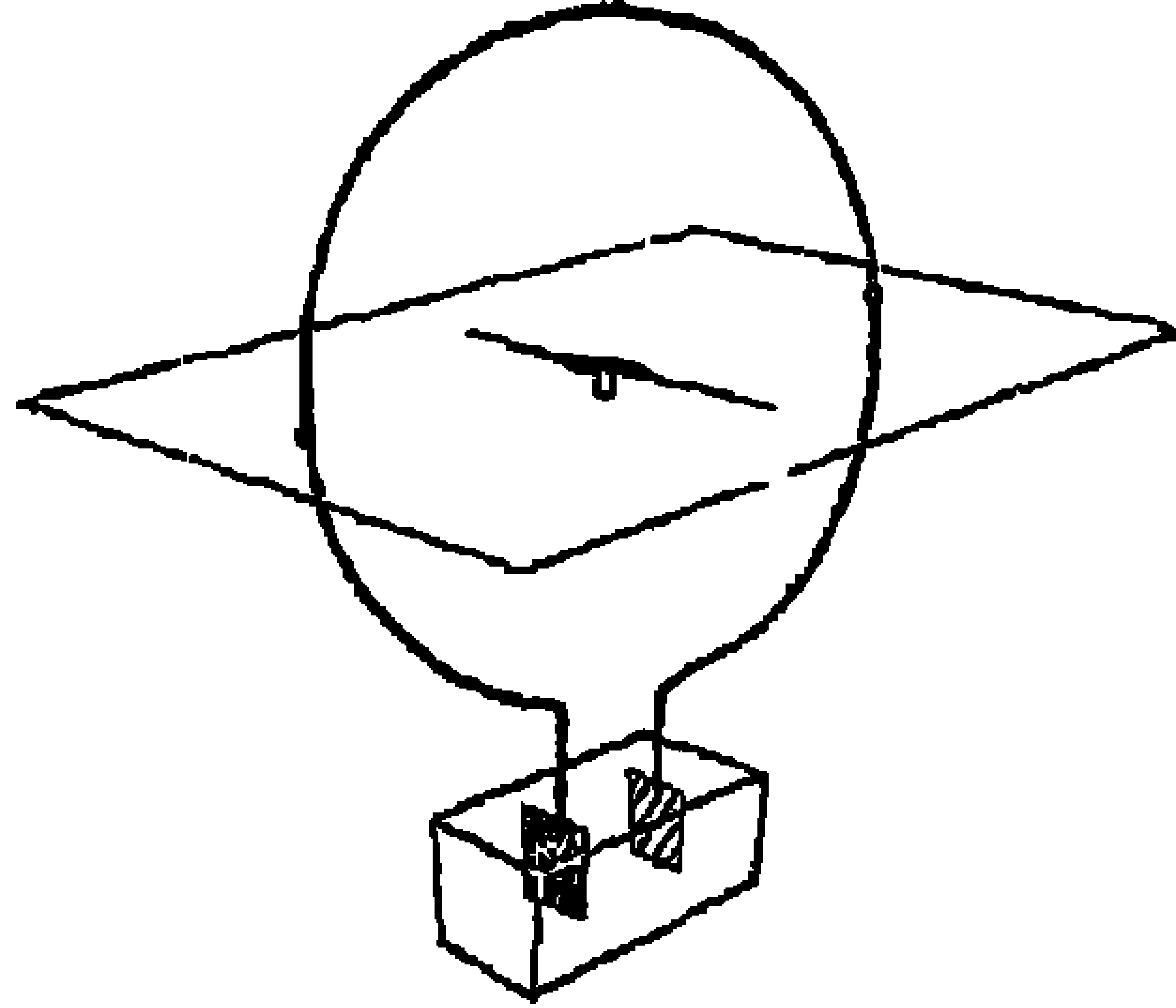
والنتيجة الغريبة لهذه التجربة أن فرق الجهد بين لوحي النحاس والزنك لايتلاشى كما فى حالة موصلين مشحونين ومتصلين بسلك بل يوجد فرق الجهد باستمرار وحسب نظرية الموائع الكهربائية ، لا بد وأن يسبب هذا الفرق فى الجهد إنسياباً مستمراً للمائع الكهربائى من الموصل ذو الجهد العالى (لوح النحاس) إلى الموصل ذو الجهد الأدنى (لوح الزنك) . لكى نحافظ على نظرية الموائع الكهربائية من الانهيار فنفترض وجود قوة ما ثابتة تؤثر فتوجد فرق الجهد وتسبب انسياب المائع الكهربائى . ولكن الظاهرة كلها مدهشة من ناحية الطاقة إذ تتولد كمية ملحوظة من الحرارة فى السلك الذى يحمل التيار لدرجة أن هذا السلك ينصهر إذا كان رفيعاً . وعلى ذلك تتولد طاقة حرارية فى السلك . ولكن بطارية فولتا كلها تكون مجموعة مقفلة وذلك لعدم وجود أى مصدر خارجى للطاقة وإذا أردنا أن نحفظ قانون بقاء الطاقة من التداعى ، يجب علينا أن نبحث أين يحدث التحويل وعلى حساب ماذا تتولد الحرارة . لا يصعب التحقق من وجود عمليات كيمائية معقدة فى البطارية ، والمواد التى تتفاعل فى هذه العمليات هى الزنك والنحاس والسائل المغموسين فيه . وهذه هى الكيفية التى تتحول بها الطاقة : طاقة كيمائية ← طاقة المائع المنساب أى التيار الكهربائى ← حرارة . ونتيجة للتغيرات الكيميائية التى تصاحب انسياب الكهرباء تصبح بطارية فولتا غير صالحة للاستعمال بمضى الوقت .

والتجربة التى كشفت فعلا عن الصعوبات الكبرى فى تطبيق الأفكار الميكانيكية لا بد وأن تبدو غريبة على أى شخص يسمع عنها للمرة الأولى . وقد أجرى أورستد هذه التجربة منذ مائة وعشرون عاماً ، وجاء فى تقريره ما يأتى :

يمكن البرهنة بهذه التجارب على أن الإبرة المغناطيسية تحركت نتيجة لجهاز جلفانى ، وذلك عند ما أقفلت الدائرة الجلفانية وليس عند فتحها ، كما حاول بعض علماء الطبيعة الأفذاذ دون جدوى منذ عدة سنين مضت » .

نفرض أن لدينا بطارية فولتا وسلك موصل . إذا وصلنا السلك إلى لوح النحاس فقط فإنه يوجد فرق فى الجهد ولكن لا يوجد تيار . نفرض أن السلك ثنى بحيث

يكون دائرة وأنه توجد إبرة مغناطيسية عند مركز السلك وفى مستويه . لايحدث أى شيء مادام السلك لا يمس لوح الزنك . لا توجد أية قوة مؤثرة ، أى أن فرق الجهد ليس له أى تأثير على وضع الإبرة . أن من الصعب فهم لماذا توقع بعض « علماء الطبيعة الافذاذ » . كما سماهم أورستد ، مثل هذا التأثير .

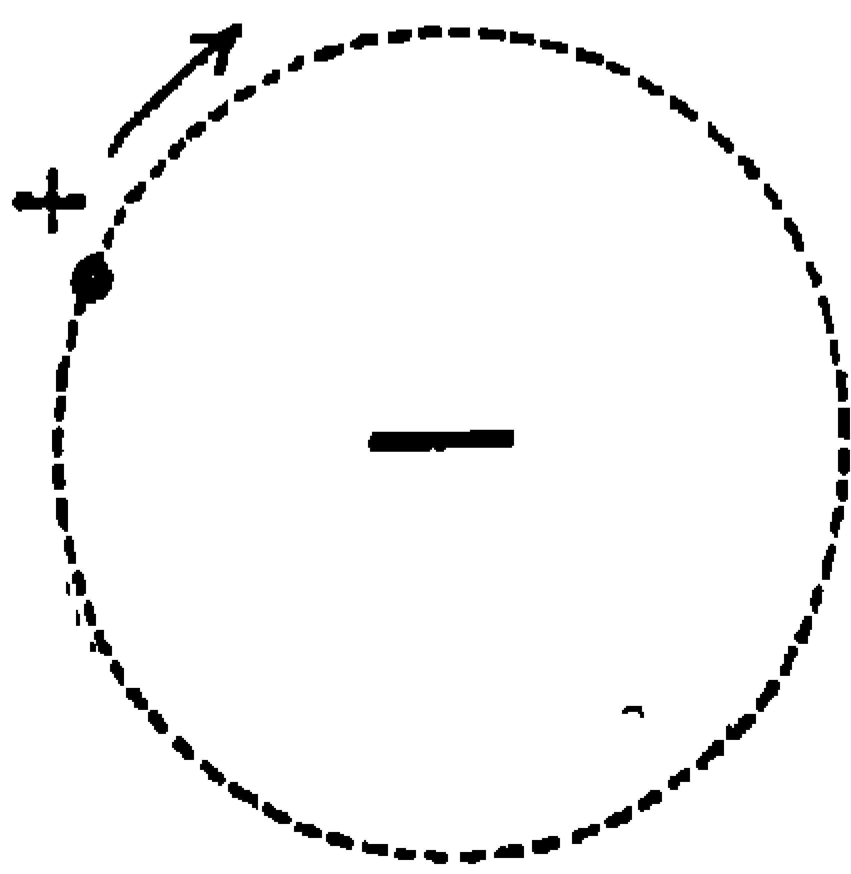


لنصل السلك الآن بلوح الزنك . يحدث شيء غريب على الفور . تدور الإبرة المغناطيسية وتأخذ وضعاً مخالفاً لوضعها الأول . وإذا كان هذا الكتاب هومستوى السلك فإن أحد قطبى الإبرة يشير الآن إلى القارىء . والذى نلاحظه هو تأثيرقوة على القطب المغناطيسى . وتؤثرهذه القوة فى اتجاه عمودىعلى الدائرة . وبعدمواجهة حقائق هذه التجربة يصعب أن نتحاشى استنتاج اتجاه القوة المؤثرة .

هذه التجربة جديرة بالاهتمام لأنها تبين العلاقة بين ظاهرتين مختلفتين هما المغناطيسية والتيار الكهربائى . ويوجد سبب آخر أقوى لأهمية هذه التجربة . لا يمكن أن تقع القوة التى تعمل بين القطب المغناطيسى والأجزاء الصغيرة للسلك الذى يمر فيه التيار على الخطوط الواصلة بين الإبرة والسلك ، أى لا يمكن أن تكون خطوط عمل القوة هى الخطوط الواصلة بين المزدوجات المغناطيسية الأولية وبين جسيمات التيار المنساب . فالقوة عمودية على هذه الخطوط ! ولأول مرة تظهر قوة تختلف تماماً عن القوى التى قصدنا ، من وجهة النظر الميكانيكية ، أن ننسب إليها جميع الأحداث فىالعالم الخارجى . ونحن نذكرأن قوة الجاذبية والقوىالمغناطيسية والكهربائية تتبع قانونى نيوتن وكولوم وتؤثر فى المستقيم الواصل بين الجسمين المتجاذبين (أو المتنافرين) .

وقد زادت هذه الصعوبة وضوحاً بتجربة أجراها رولاند بمهارة منذ ستين عاما . وإذا تركنا التفاصيل الفنية جانباً فإنه يمكن وصف هذه التجربة كما يلى : تخيل كرة صغيرة مشحونة بالكهرباء . تخيل أيضاً أن هذه الكرة تتحرك بسرعة كبيرة فى دائرة يوجد عند مركزها إبرة مغناطيسية . أساس هذه التجربة هو نفس أساس تجربة أورستد والفرق الوحيد هو أننا نستعيض عن التيار بحركة ميكانيكية للشحنة الكهربائية . وجد رولاند أن النتيجة تشابه النتيجة التى نحصل عليها عندما يمر تيار فى سلك دائرى أى أن المغناطيس ينحرف بتأثير قوة عمودية .

لنفرض الآن أن الشحنة تتحرك بسرعة أكبر . نتيجة لذلك تزداد القوة التى تؤثر على القطب المغناطيس وبذلك يزداد الانحراف عن الوضع الأصلى . تبين هذه النتيجة صعوبة أخرى . ففضلا عن أن القوة لا تؤثر فى الخط الواصل بين الشحنة والمغناطيس فإن شدتها تتوقف على سرعة الشحنة . لقد بنيت وجهة النظر الميكانيكية جميعها على الاعتقاد بأن جميع الظواهر يمكن تفسيرها بدلالة قوى تتوقف على البعد فقط وليس على السرعة . ومن المؤكد أن نتيجة تجربة رولاند تزعزع هذا الاعتقاد .



ومع ذلك فربما نكون من المحافظين ونحاول أن نبحث عن حل لا يتعارض مع المبادىء السابقة .

كثيراً ما تنشأ فى العلم صعوبات مفاجئة وغير منتظرة مثل الصعوبات السابقة ، وهى تضع بذلك عقبات فى طريق التطور الناجح لنظرية ما . وفى بعض الأحيان يبدو أن إدخال تعميم بسيط على الأفكار القديمة قد يخلصنا من هذه الصعوبات ولو بصفة مؤقتة . فمثلا قد يبدو فى الحالة الحاضرة أن تدخل قوى أخرى عامة تؤثر على الجسيمات الصغيرة . ومع ذلك فكثيراً ما يصعب ترقيع نظرية قديمة ، وتؤدى الصعوبات إلى القضاء على النظرية القديمة ونشأة أخرى جديدة . ولم يكن سلوك الإبرة المغناطيسية هو العامل الوحيد فى سقوط النظريات الميكانيكية التى

كانت تبدو ناجحة وذات أساس متين . فقد ظهر هجوم شديد آخر من ناحية أخرى مختلفة تماماً . ولكن هذه قصة أخرى سنقصها فيما بعد .

سرعة الضوء :

فى كتاب «علمان جديدان» لجاليليو ، محادثة بين الأستاذ وتلاميذه موضوعها سرعة الضوء :

ساجريدو : ولكن ماهو نوع سرعة الضوء هذه وبأية درجة هى كبيرة ، هل هى آنية أم لحظية أم تحتاج إلى وقت مثل أية حركة أخرى ؟ وهل يمكن تحديد الاجابة على هذه الأسئلة بالتجربة ؟

سيمبليكو : تبين جميع المشاهدات اليومية فى الحياة العملية أن انتشار الضوء آنى ، وذلك لأننا نرى لهب قديفة المدفع على بعد كبير دون مضى أى وقت ولكن دويها لا يصل إلى الأذن إلا بعد فترة زمنية ملحوظة .

ساجريدو : حسناً ياسمبليكو . النتيجة الوحيدة التى يمكننى استنتاجها من هذه التجربة المألوفة هى أن صوت القذيفة يصل إلى الأذن بسرعة أصغر من التى يصل بها الضوء إلى العين ، ولكنها لاتبين ماذا كان وصول الضوء آنى أم أنه يحتاج إلى وقت رغم أنه سريع جداً ...

سالفاتى : لقد قادتنى النتائج البسيطة لهذه المشاهدات وما ماثلها إلى تصميم طريقة يمكن بواسطتها التأكد مما إذا كانت آنية حقاً . . .

ويأخذ سالفاتى فى شرح طريقة تجربته . ولكى نفهم فكرته سنفرض أن سرعة الضوء صغيرة فضلاً عن فرضنا أنها محدودة ، أى أننا سنفترض أن حركة الضوء قد أبطئت مثل حركة فلم سينمائى بطىء . رجلان ا ، ب يحمل كل منهما مصباح مغطى ويقفان على بعد ميل من بعضهما . يضىء الرجل الأول ا مصباحه . لقد اتفق الرجلان على أن يضىء ب مصباحه عند اللحظة التى يرى فيها ضوء مصباح ا . لنفرض فى « حركتنا البطيئة » أن الضوء يسير مسافة قدرها ميل فى الثانية الواحدة . يرسل ا اشارته برفع الغطاء عن مصباحه . يرى ب هذه الأشارة

بعد مرور ثانية واحدة ويجيبها برفع الغطاء عن مصباحه . ولا تصل إشارة ب إلى ا إلا بعد مرور ثانيتين من إعطائه (أى ا) إشارته . أى أنه إذا كان الضوء يسير بسرعة ميل فى الثانية فإنه يتحتم أن تمضى ثانيتان بين اللحظة التى يرسل فيها ا إشارته واللحظة التى يرى فيها إشارة ب ، على فرض أن ب يبعد عن ا مسافة قدرها ميل واحد . وبالعكس إذا كان ا يجهل سرعة الضوء ولكنه يفترض أن زميله قد حافظ على الاتفاق السابق وإذا رأى إشارة ب بعد ثانيتين من إرسال إشارته فإنه يستنتج أن الضوء يسير بسرعة ميل فى الثانية .

وكان احتمال استطاعة جاليليو تعيين سرعة الضوء بهذه الطريقة ضعيفاً جداً وذلك لسوء حالة الوسائل والأجهزة اللازمة للتجارب العملية فى ذلك الوقت . ولو كانت السافة ميلاً واحداً لوجب عليه أن يقيس فترات زمنية صغيرة مثل $\frac{١}{١٠^٥}$ من الثانية ! !

ولقد صاغ جاليليو مسألة تعيين سرعة الضوء ولكنه لم يحلها . وفى أغلب الأحيان تكون صياغة السؤال أهم من حله ، فقد لا يعتمد الحل إلا على مهارة رياضية أو تجريبية . وتحتاج صياغة الأسئلة الجديدة أو إثارة الاحتمالات الجديدة أو النظر إلى المسائل القديمة من وجهة نظر جديدة إلى خيال ممتاز وتفكير مبدع وهى تسجل تقدماً حقيقياً للعلم بالتفكير فى تجارب وظواهر معلومة تفكيراً جديداً والنظر إليها من وجهات أخرى حصلنا على قاعدة القصور الذاتى وقانون بقاء الطاقة . وسيجد القارىء فى الصفحات التالية أمثلة عديدة من هذا النوع حيث تبدو أهمية النظر فى الحقائق المعروفة من وجهة نظر جديدة وحيث بذلك تنشأ نظريات جديدة .

نعود الآن إلى المشكلة السهلة نسبياً ألا وهى تعيين سرعة الضوء . إن من الغريب حقاً أن جاليليو لم يدرك أن من الممكن أن يقوم رجل واحد بإجراء هذه التجربة بسهولة ودقة . ففى استطاعة الرجل استعمال مرآة فى نفس المكان الذى يقف فيه زميله بدلا من هذا الزميل . فالمرآة تعيد الإشارة أتوماتيكياً بمجرد وصولها .

وبعد حوالى مائتين وخمسين عاماً استعمل فيزو نفس هذه الفكرة ، وهو أول من عين سرعة الضوء بتجارب أجريت على سطح الكرة الأرضية . ولقد عين رومر سرعة الضوء قبل فيزو بكثير باستخدام مشاهدات فلكية ، ولكن النتيجة التى حصل عليها فيزو أدق من التى حصل عليها رومر .

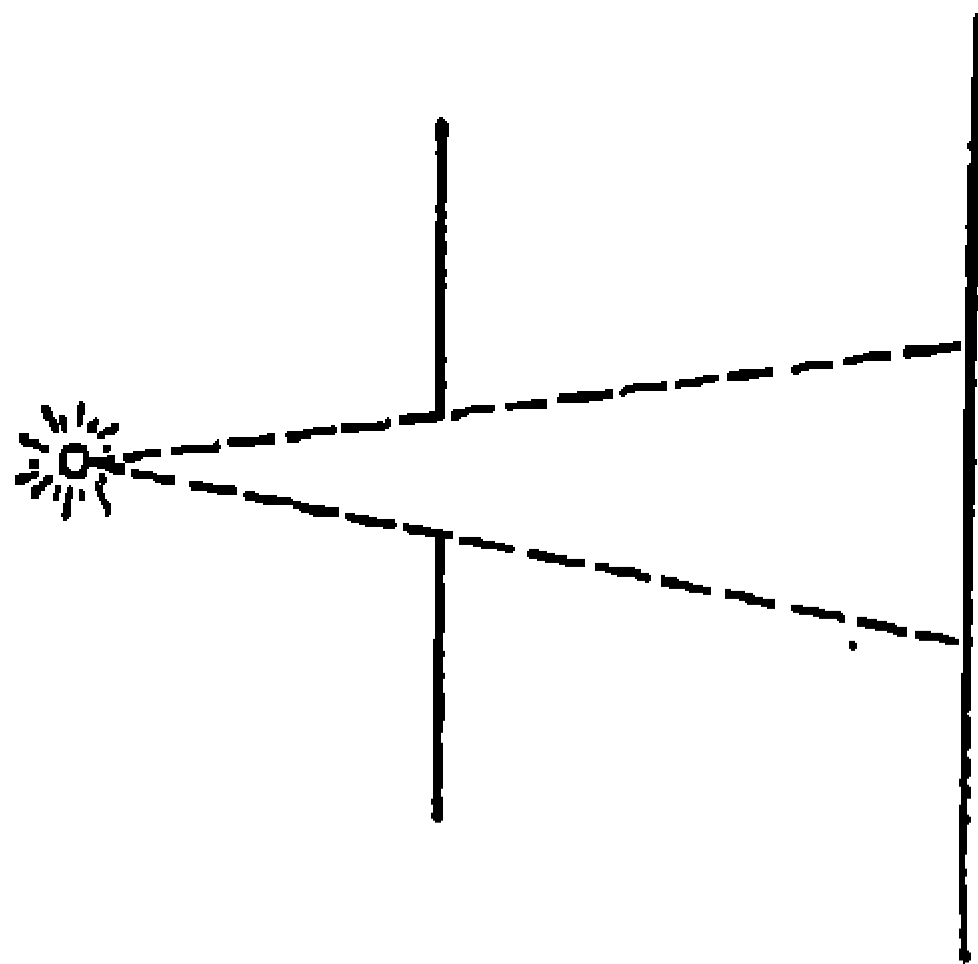
من الواضح أنه نتيجة لكبر سرعة الضوء الهائل ، تلزم لقياسها مسافات كبيرة يمكن مقارنتها بالبعد بين الأرض وأحد كواكب المجموعة الشمسية مثلا ، أوباستعمال أجهزة علمية بعد تحسينها وزيادة درجة دقتها زيادة كبيرة . وقد استعمل رومر الطريقة الأولى وفيزو الطريقة الثانية . ولقد عين العدد الكبير الذى يمثل سرعة الضوء عدة مرات بعد هاتين التجربتين ، وكانت درجة الدقة تزداد كل مرة . وقد اخترع ميكلسون طريقة دقيقة للغاية لتعيين سرعة الضوء فى القرن الحالى . ويمكن التعبير عن نتيجة هذه التجارب كما يأتى : سرعة الضوء فى الفراغ تساوى :

١٨٦٠٠٠ ميل فى الثانية تقريباً أو ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر فى الثانية .

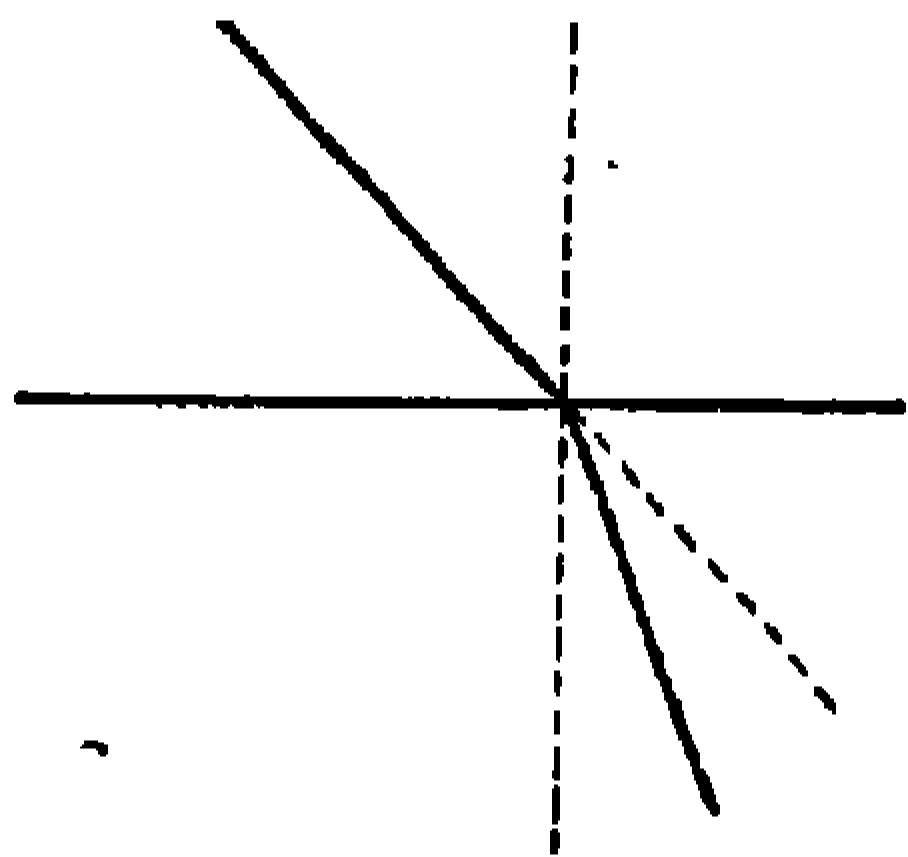
النظرية الجسمية للضوء :

مرة أخرى نبدأ ببعض الحقائق العملية . العدد الذى أعطيناه فيماسبق هو سرعة الضوء فى الفضاء الخيالى . إذا لم يقابل الضوء عقبات فإنه يسير فى الفضاء الخالى بهذه السرعة . والملاحظ أننا نستطيع الرؤية خلال وعاء زجاجى مفرغ من الهواء كما يمكننا رؤية الكواكب والنجوم والسدم رغم أن الضوء يصل إلينا من هذه الأجسام مخترقاً الأثير . وإن إمكان الرؤية خلال وعاء زجاجى سواء أكان بها هواء أم لا ، ليبين أن وجود الهواء لا أثر له . ولهذا السبب يمكننا إجراء التجارب الضوئية فى حجرة عادية كما لو كانت مفرغة من الهواء دون أن يؤثر ذلك فى النتيجة . وإحدى الحقائق الضوئية البسيطة هى أن الضوء يسير فى خطوط مستقيمة . وسنصف تجربة أولية بسيطة توضح ذلك . توضع ستارة بها ثقب أمام نقطة ضوئية . والنقطة الضوئية هى مصدر ضوئى صغير جداً مثل فتحة صغيرة فى غطاء مصباح . وإذا كان هناك حائط على بعد من الستارة فإن الثقب الموجود

فيها يظهر على الحائط كدائرة مضيئة وسط ظلام ، والرسم التالى يبين العلاقة بين هذه الظاهرة وبين سير الضوء فى خطوط مستقيمة . ويمكن بفرض أن الضوء يسير فى الفراغ أو فى الهواء فى خطوط مستقيمة تفسير جميع الظواهر المشابهة التى يظهر فيها الضوء والظل وأشباه الظلام .

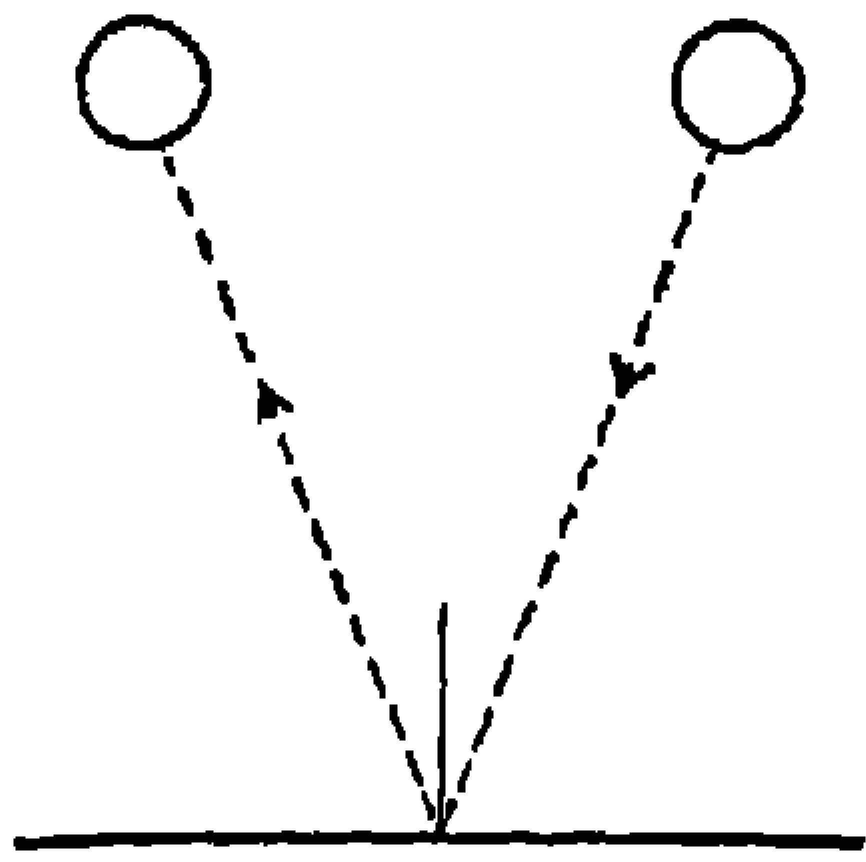


لنعتبر الآن مثالا آخر وهو عند ما يسير الضوء خلال مادة . نفرض أن لدينا شعاعاً ضوئياً يتحرك فى الفراغ ويقابل سطحاً من الزجاج ولنتساءل ماذا يحدث فى هذه الحالة ؟ والجواب أنه إذا كانت قاعدة سير الضوء فى خطوط مستقيمة صحيحة أيضاً فى هذه الحالة فإن مسار الشعاع يكون ممثلا بالخط المتقطع وفى الواقع أن المسار ليس كذلك . يوجد انكسار فى المسار كما هو موضح فى الشكل ، والذى تشاهده هو فى الواقع الظاهرة المسماة بالانكسار . إذا غمست عصاة فى ماء فإنها تظهر كأنها مثنية عند وسطها ، وليست هذه سوى إحدى صور الانكسار العديدة .



تبين هذه الحقائق أن فى الإمكان تكوين نظرية ميكانيكية بسيطة للضوء ، وغرضنا هنا هو أن نبين كيف وجدت المسميات « السيال والجسيمات والقوى » طريقها إلى مجال الضوء وكيف انهارت الفكرة الفلسفية القديمة فى النهاية . وتظهر النظرية هنا فى صورة بدائية بسيطة . لنفرض أن جميع الأجسام المضيئة تشع جسيمات تقابل العين فتولد إحساساً للضوء . ولقد تعودنا إذا لزم الأمر أن ندخل أنواعاً جديدة من المادة للحصول على تفسير ميكانيكى وعلى ذلك فإننا سنقوم بذلك هنا دون تردد . فى الفراغ الخالى لابد وأن تتحرك هذه الجسيمات فى خطوط

مستقيمة بسرعة معلومة . وبذلك تصل إلى العين رسالة من الأجسام المشعة . وجميع الظواهر التي تنتج عن سير الضوء في خطوط مستقيمة تؤيد نظرية الجسيمات ، وذلك لأن هذا النوع من الحركة بالذات قد أدخل خصيصاً للجسيمات . والنظرية تفسر أيضاً وبسهولة انعكاس الضوء على المرايا ، كما هو مشاهد في التجربة الميكانيكية التي يلقى فيها بكرات مرنة على حائط والرسم التالي يوضح ذلك .



وتفسير ظاهرة الانكسار أصعب من ذلك بقليل . وسنبين إمكان التفسير الميكانيكي دون الدخول في التفصيلات . إذا سقطت الجسيمات على سطح من الزجاج مثلا فربما تؤثر عليها جزيئات المادة بقوة تؤثر (مع غرابة ذلك) في الجوار المباشر للمادة فقط . وكما نعلم ، كل قوة تؤثر على نقطة متحركة تغير سرعتها . وإذا كانت القوة المحصلة التي تؤثر على جسيمات الضوء هي قوة جاذبة عمودية على سطح الزجاج ، فإن خط الحركة الجديد يكون واقعاً بين خط الحركة الأول وبين العمودي على السطح . يبدو أن هذا التفسير يؤيد نظرية الجسيمات للضوء . ومع ذلك فلتحديد فائدة هذه النظارية ومدى صحتها ، يتحتم علينا أن ندرس حقائق جديدة أكثر تعقيداً .

لغز الألوان :

مرة أخرى كانت عبقرية نيوتن هي التي فسرت لأول مرة كثرة الألوان في الكون . وفيما يلي نقتبس عن نيوتن وصفاً لإحدى تجاربه :

« في عام ١٦٦٦ (وهو الوقت الذي اشتغلت فيه بصقل زجاجات ضوئية ذات سطح غير كرى) استعملت منشوراً ثلاثياً من الزجاج لدراسة ظاهرة الألوان المشهورة . وقد أظلمت حجرتي وقمت بعمل ثقب صغير في النافذة وذلك لأحصل على كمية مناسبة من ضوء الشمس . وقد وضعت المنشور عند مصدر الضوء بحيث ينكسر الضوء ويصل إلى الحائط المقابل .

ولقد سررت لرؤية الضوء المنكسر الناتج ذى الألوان الزاهية القوية » .

وضوء الشمس « أبيض » ولكن بعد المرور خلال المنشور يتحول ضوء الشمس « الأبيض » إلى جميع الألوان الموجودة فى الكون . والطبيعة نفسها تعطينا نفس النتيجة فى قوس قزح الجميل . ومنذ قديم الأزل توجد محاولات لتفسير هذه الظاهرة ، والعقبة الموجودة فى الأنجيل التى تقول بأن قوس قزح هو توقيع الله على معاهدة مع الإنسان هى « نظرية » من وجهة نظر معينة ، ولكنها لا تفسر لماذا يتكرر قوس قزح من وقت لآخر عند نزول المطر . ونيوتن هو أول من عالج لغز اللون بأكمله وبطريقة علمية كما أشار إلى حله فى عمله العظيم .

يكون أحد حدّىْ قوس قزح دائماً أحمر بينما يكون الآخر بنفسجياً وبين هذين اللونين توجد جميع الألوان الأخرى بترتيب معين . وتفسير نيوتن لهذه الظاهرة هو ما يأتى : توجد جميع الألوان فعلا فى الضوء الأبيض . وهذه الألوان تنتقل جميعها بين الكواكب وفى الجو متحدة ببعضها فيكون لها تأثير الضوء الأبيض ، ويمكننا أن نقول أن الضوء الأبيض هو مزيج من جسيمات مختلفة تناظر ألواناً مختلفة . وفى التجربة التى أجراها نيوتن ، يشتت المنشور هذه الألوان المختلفة فى الفضاء . حسب النظرية الميكانيكية للضوء يكون السبب فى الانكسار هو قوى تنتج عن جزيئات الزجاج وتؤثر على جسيمات الضوء . وتختلف القوى التى تؤثر على الجسيمات التى تنتسب إلى الألوان المختلفة ، فتكون أشد ما يمكن للون البنفسجى وأضعف ما يمكن للون الأحمر . وعلى ذلك تأخذ الألوان المختلفة مسارات مختلفة بعد انكسارها وتتفرق عند ما يترك الضوء المنشور . وفى حالة قوس قزح تقوم قطرات الماء بعمل المنشور .

لقد أخذت النظرية الجسيمية للضوء صورة أكثر تعقيداً من صورتها الأولى، فبدلا من نوع واحد فقط لدينا الآن أنواعاً مختلفة من الضوء الجسيمى ، وكل نوع له لون معين . ومع ذلك فيجب إذا كانت هذه النظرية صحيحة ، أن تتفق نتائجها مع المشاهدات .

تسمى مجموعة الألوان الموجودة فى ضوء الشمس الأبيض (كما وجدها نيوتن) طيف الشمس ، أو بتعبير أدق طيف الشمس المرئى . ويسمى تحليـل الضوء الأبيض إلى مركباته ، كما وصفناه هنا ، تشتت الضوء . وإذا كان التفسير الذى أعطيناه صحيحاً ، فإنه يمكن مزج ألوان الطيف المتفرقة مرة أخرى باستعمال منشور آخر يوضع فى وضع معـين ، ويجب أن تـكون العملية الجديدة عكس العملية الأولى بالضبط . يجب أن نحصل على الضوء الأبيض من الألوان التى تفرقت بالعملية السابقة . والواقع أن نيوتن قد برهن بهذه التجربة البسيطة أنه يمكن الحصول على الضوء الأبيض من طيفه وعلى الطيف من الضوء الأبيض أى عدد المرات . ولقد أيدت هذه التجارب تأييداً قوياً النظرية التى فيها تبدو جسيمات كل لون كمادة غير قابلة للتغيير .

وكتب نيوتن يقول :

« وهذه الألوان ليست ألواناً حديثة التولد ولـكنها تظهر نتيجة لتفريقها فقط ، وذلك لأننا إذا مزجناها مرة أخرى فإننا نحصل على لونها قبل التفريق . ولنفس هذا السبب لا يحدث أى تحول حقيقى عند مزج الألوان المتفرقة وذلك لأنه عند تفريق هذه الألوان المتجمعة ثانية تظهر نفس الألوان التى ظهرت عند تشتيت الضوء الأبيض أول مرة . ويمكن تمثيل ذلك بعملية مزج مسحوقين أحدهما أصفر والآخر أزرق مزجاً جيداً . للعين المتجردة يظهر الخليط كأنه ذو لون أخضر رغم أن لون ذرات المسحوقين لم يتغير حقيقة ؛ وباستعمال ميكروسكوب جيد تظهر الذرات متفرقة بلونيها الأزرق والأصفر » .

نفرض أننا عزلنا شريحة ضيقة جداً من الطيف . هذا يعنى أننا نسمح للون واحد فقط بأن يمر من شق ضيق طويل بينما تحجز الألوان الأخرى على حاجز . يـكون الضوء الذى يمر من هـذا الثقب متجانساً ، أى ضوء لا يمكن تحليله إلى مركبات أخرى . والعبارة السابقة تنتج من النظرية وقد تحقق بالتجربة أنه لا يمكن بأى حال من الأحوال تقسيم هذا الشعاع ذى اللون الواحد مرة أخرى . وهناك طرق بسيطة للحصول على مصادر للضوء المتجانس . فمثلا يشع الصوديوم الساخن

ضوءاً منتظماً ذا لون أصفر . ويكون من الأنسب فى أغلب الأحيان إجراء بعض التجارب الضوئية باستعمال ضوء منتظم وذلك لأن النتيجة ، كما ننتظر ، تكون أبسط كثيراً .

لنفرض الآن فرضاً غريباً وهو أن الشمس قد بدأت فجأة تشع ضوءاً منتظماً ذا لون معين ، أصفر مثلاً . نتيجة لذلك تختفى جميع الألوان الموجودة فى الكون عدا اللون الأصفر . ويكون لون أى جسم إما أصفر أو أسود ! . وليس هذا إلا نتيجة للنظرية الجسيمية للضوء لأنه لا يمكن الحصول على ألوان جديدة من الضوء المنتظم . ويمكن التحقق من صحة ذلك بالتجربة . إذا وضعنا قطعة صوديوم ساخنة جداً فى حجرة مظلمة فإن لون أى شىء فى هذه الحجرة يكون إما أصفر أو أسود . والواقع أن اختلاف الألوان فى الكون يدل على كثرة الألوان التى تكون الضوء الأبيض .

يبدو أن النظرية الجسيمية للضوء تنجح فى شرح جميع هذه الحالات تماماً ، رغم أن إدخال أنواع جديدة من الجسيمات بعدد الألوان المختلفة يضايق بعض الشىء . ويبدو أيضاً الفرض بأن جميع جسيمات الضوء تسير بنفس السرعة فرضاً متكلفاً وغير حقيقى .

ويمكننا أن نتخيل أن نظرية مختلفة تمام الاختلاف ومبنية على مجموعة من الفروض الأخرى قد تعطى التفسيرات المطلوبة ولا تجد ما يعارضها . وفى الواقع أننا سنشهد فى القريب العاجل نشأة نظرية أخرى مبنية على أفكار مختلفة تماماً عن الأفكار السابقة وبالرغم من ذلك فإنها تفسر نفس مجموعة الظواهر الضوئية التى فسرتها النظرية السابقة . وقبل صياغة الفروض التى تعتمد عليها النظرية الجديدة يتحتم علينا أن نجيب على سؤال يتعلق بهذه الاعتبارات الضوئية . يجب علينا أن نعود إلى الميكانيكا ونسأل :

ماهي الموجة ؟

إذا نشأت إشاعة فى لندن فإنها تصل إلى أدنبرة بسرعة رغم عدم انتقال أى شخص ممن اشترك فى نشرها بين هاتين المدينتين . تصادفنا الآن حركتان مختلفتان ، حركة الإشاعة من لندن إلى أدنبرة وحركة الأشخاص اللذين ينشرون الإشاعة . والريح التى تمر فوق حقل من القمح تسبب موجة تنتشر عبر الحقل كله . مرة ثانية يجب علينا أن نميز بين حركة الموجة وحركة سنابل القمح المختلفة التى لاتعانى إلا ذبذبات صغيرة .

كلنا قد رأينا الموجات التى تنتشر فى دوائر تتسع تدريجياً عند إلقاء حجر فى بركة ماء . حركة الموجة تختلف تماماً عن حركة جسيمات الماء . الجسيمات ترتفع وتنخفض فقط . والحركة الموجية التى نشاهدها هى حركة حالة من حالات المادة وليست حركة المادة نفسها . ويتضح ذلك تماماً من حركة قطعة من الفلين طافية فوق الماء ، فهى تعلو وتنخفض فقط تبعاً لحركة الماء بدلاً من أن تسير مع الموجة .

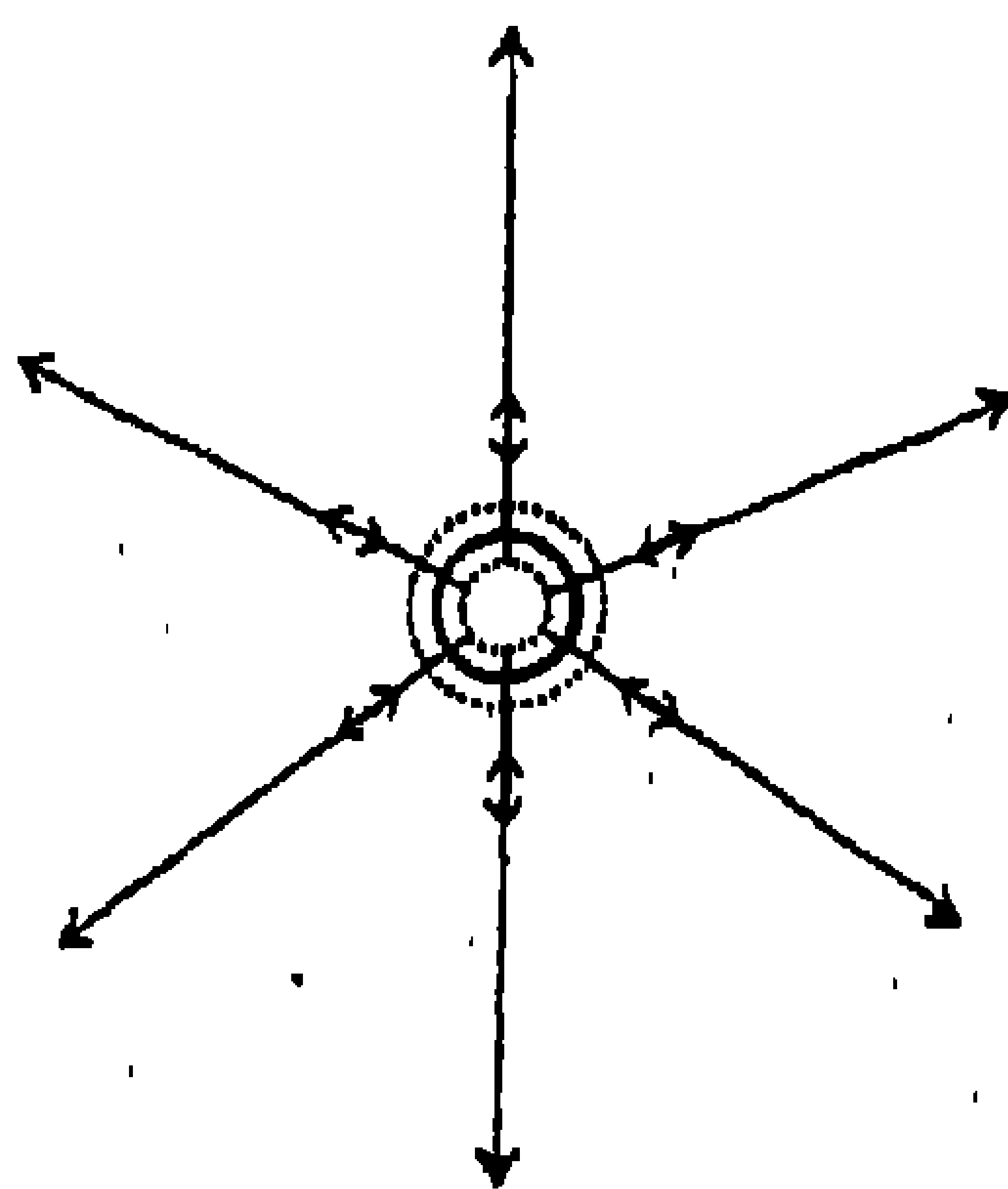
ولكى نفهم التركيب الميكانيكى للموجة ، سنعتبر تجربة مثالية أخرى . نفرض أن فراغاً كبيراً مملوء بانتظام بالماء أو الهواء أو أى وسط آخر ، وأنه توجد كرة فى موضع متوسط من هذا الفراغ . لنفرض أنه عند بدء التجربة لا توجد حركة على الاطلاق ، وفجأة تبدأ الكرة فى « التنفس » توافقيا ، فيزداد حجمها وينقص رغم احتفاظها بشكلها الكرى . ترى ماذا يحدث فى الوسط الموجودة فيه الكرة نتيجة لهذه الحركة ؟

نبدأ دراستنا فى اللحظة التى تبدأ فيها الكرة فى التمدد . تدفع جزيئات الوسط الموجودة فى الجوار المباشر للكرة بعيداً ، وعلى ذلك تزداد كثافة قشرة كروية من الماء (أو الهواء) عن قيمتها العادية . بالمثل ، عندما تنقبض الكرة تصغر كثافة جزء الماء الذى يحيط مباشرة . وتنتشر هذه التغيرات فى الكثافة خلال الوسط كله . وتعمل الجسيمات المكونة للوسط ذبذبات صغيرة فقط ، ولكن الحركة الناتجة جميعها هى حركة موجة تقدمية . والشىء الأساسى هنا ، هو أننا نعتبر لأول مرة حركة شىء ليس بمادة وإنما هو طاقة منقولة خلال المادة .

باستعمال مثال الكرة النابضة يمكننا إدخال فكرتين طبيعيتين عامتين .

الفكرة الأولى هى السرعة التى تتحرك بها الموجة . تتوقف هذه السرعة على الوسط فتختلف فى الماء عنها فى الهواء مثلا . والفكرة الثانية هى طول الموجة . فى حالة الأمواج التى تنشأ على سطح بحر أو نهر يكون طول الموجة هو البعد بين قمتى موجتين متتاليتين أو البعد بين قاعى موجتين متتاليتين . وعلى ذلك يكون طول الموجة فى حالة موجات البحر أكبر من طول الموجة فى حالة موجات النهر . وفى حالة الموجات التى تحدث نتيجة لكرة النابضة يكون طول الموجة هو البعد ، عند لحظة معينة ، بين قشرتين كرويتين متجاورتين ، كثافتهما إما نهاية عظمى أو نهاية صغرى . من الواضح أن هذا الطول كما يتوقف على الوسط يتوقف أيضاً على معدل نبض الكرة ، فإذا كان نبض الكرة سريعاً فإن طول الموجة يقصر وإذا كان نبض الكرة بطيئاً فإن طول الموجة يزداد .

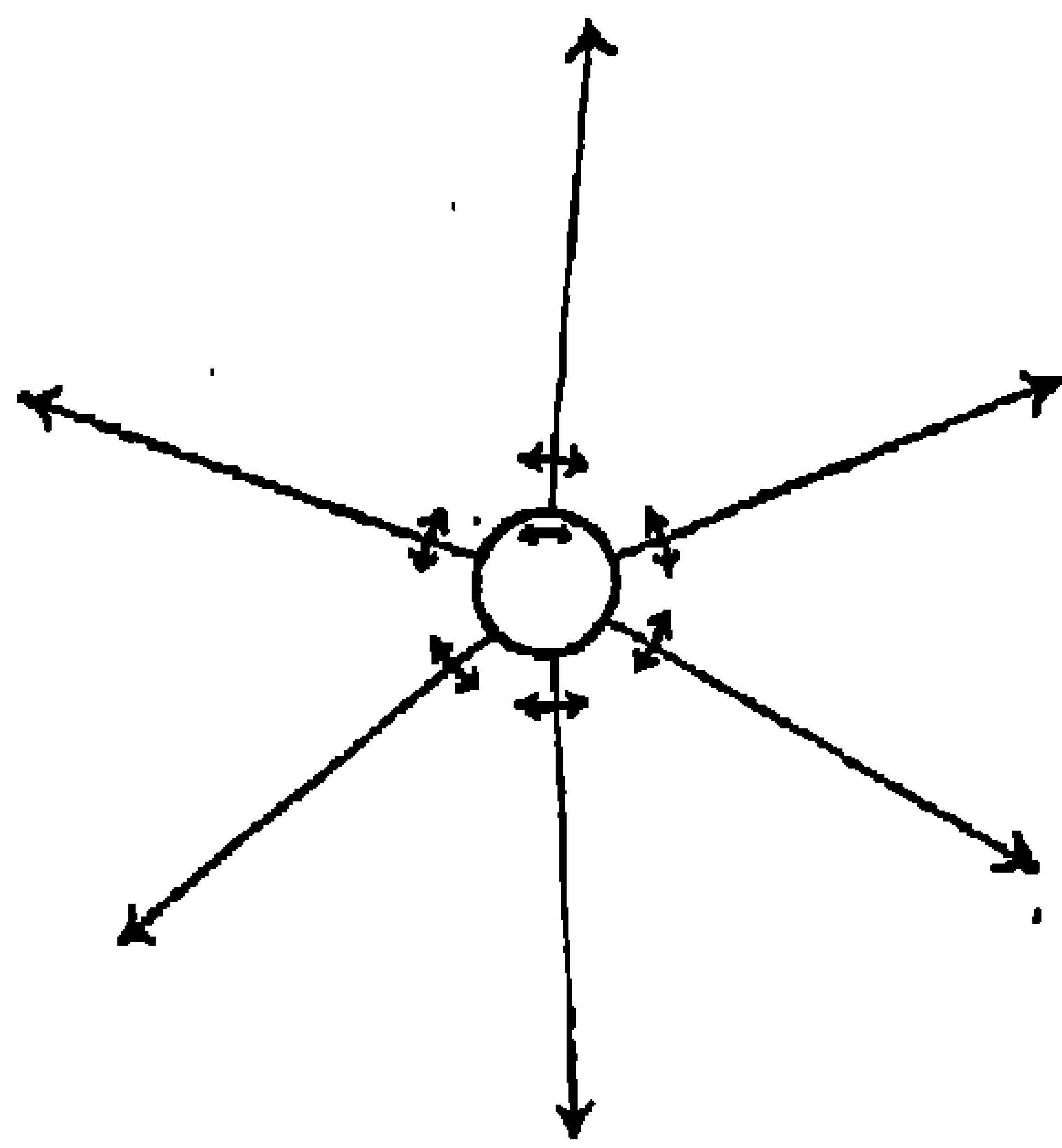
لقد أحرزت فكرة الموجة هذه نجاحاً كبيراً فى علم الطبيعة ، ومن المؤكد أنها فكرة ميكانيكية ، إذ تفسر الظواهر بدلالة حركة جسيمات وحسب نظرية الحركة ، تكون هذه الجسيمات المادة . وعلى ذلك يمكن على العموم اعتبار أية نظرية تستخدم فيها فكرة الموجة نظرية ميكانيكية . فمثلا أساس تفسير الظواهر الصوتية هو هذه الفكرة . فالأجسام المتذبذبة ــ مثل الأوتار الصوتية وأوتار القيثارة ــ هى مصادر للموجات الصوتية التى تنتشر فى الهواء بنفس الطريقة التى شرحناها فى حالة الكرة النابضة . وعلى ذلك يمكننا أن نضم جميع الظواهر الصوتية إلى الميكانيكا باستعمال فكرة الموجة .



لقد وضحنا أنه يجب التمييز بين حركة الجسيمات وبين حركة الموجة نفسها التى هى حالة للوسط . ورغم أن الحركتين مختلفتان فإنه من الواضح فى مثال الكرة النابضة أن الحركتين تكونان فى نفس المستقيم . تتذبذب جسيمات الوسط فى أجزاء صغيرة خطية ، وتزداد الكثافة وتنقص دوريا مع هذه الحركة . والاتجاه الذى تنتشر فيه

الموجه هو نفس الخط الذى تقع عليه الذبذبات . ويسمى هذا النوع من الموجات موجات طولية . ولكن هل هذا هو النوع الوحيد من الموجات ؟ من المهم لدراستنا التالية أن ندرك إمكان وجود نوع آخر من الموجات يسمى بالموجات المستعرضة .

فلنغير مثالنا السابق . نغمس الكرة هذه المرة فى وسط من نوع آخر ، مثلا الغراء بدلا من الماء أو الهواء . وبدلا من أن تنبض الكرة سنجعلها تدور زاوية صغيرة فى اتجاه واحد ثم تعود ثانية على أن تكون الحركة توافقية دائما وحول محور معين . يلتصق الغراء بالكرة وعلى ذلك تجبر أجزاء الغراء الملتصقة على أن تقلد الحركة ، وهذه الأجزاء تجبر كذلك الأجزاء الموجودة على بعد صغير منها على أن تقلد نفس الحركة ، وهكذا . بذلك تتكون موجة فى الوسط ، وإذا تذكرنا التمييز بين حركة الوسط وحركة الموجة فإننا نرى أنهما لا يقفا على نفس الخط فى هذه الحالة . تنتقل الموجة فى اتجاه نصف قطر الكرة بينما يتحرك الوسط عمودياً على هذا الاتجاه . بذلك تتكون موجة مستعرضة قد تولدت ..



والموجات التى تنتشر على سطح الماء هى موجات مستعرضة . إذ أنه بينما تنتشر الموجة فى مستو أفقى ، تتحرك قطعة من الفلين طافية رأسياً إلى أعلى وإلى أسفل . أما الموجات الصوتية فهى أكثر الأمثلة المألوفة للموجات الطولية .

وثمة ملاحظة أخرى أخيرة : الموجة الناتجة عن كرة نابضة أو متذبذبة هى موجة كرية وسبب هذه التسمية هو أنه عند أى لحظة معينة تسلك جميع النقط الموجودة على سطح كرة محيطة بمصدر الموجة نفس السلوك . لنعتبر قطعة من كرة مثل هذه على بعد كبير من المصدر . كلما كانت القطعة صغيرة وبعيدة كلما كانت تشبه قطعة مستوية ، ويمكننا أن نقول دون أن ندعى درجة كبيرة

فى الدقة ، أنه لا يوجد فرق أساسى بين قطعة مستوية وبين قطعة من كرة نصف قطرها كبير جداً ، وفى كثير من الأحيان تسمى الأجزاء الصغيرة من موجات كرية بعيدة جداً عن المصدر موجات مستوية . وكلما كان الجزء المظلل فى الرسم



بعيداً عن المركز والزاوية المحصورة بين نصفى القطرين صغيرة ، كلما كان تمثيل الموجة المستوية أفضل . وفكرة الموجة المستوية ، مثل كثير من الأفكار الطبيعية الأخرى ، ليست إلا خيالاً يمكن تحقيقه إلى درجة محدودة من الدقة فقط . ومع ذلك فهى فكرة مفيدة سنحتاج إليها فيما بعد .

النظرية الموجية للضوء :

دعنا نتذكر لماذا توقفنا عن وصف الظواهر البصرية . كان غرضنا هو إدخال نظرية جديدة للضوء تختلف عن نظرية الجسيمات ولكنها تفسر الحقائق التى سبق ذكرها . وللقيام بذلك ، اضطررنا إلى أن نقطع قصتنا وندخل فكرة الموجات . والآن يمكننا أن نعود إلى هذا الموضوع .

وكان هيجنز — أحد معاصرى نيوتن — هو الذى وضع نظرية جديدة تماماً للضوء ؛ وقد كتب هيجنز فى مؤلفه عن الضوء يقول :

وإذا كان الضوء يستغرق وقتاً لانتقاله (وهى المسألة التى سنبحثها الآن) فإنه ينتج أن هذه الحركة — الدخيلة على مادة الوسط — متوالية وعلى ذلك فهى تنتشر على هيئة سطوح كرية مثل الموجات الصوتية . وأنا أسميها موجات ، للتشابه الموجود بينها وبين الموجات التى تتكون فى الماء عندما يلقى حجر فيه والتى تنتشر على

هيئة دوائر متتالية رغم أن الموجات فى الحالة الأخيرة توجـد جميعها فى مستو واحد » .

وفى رأى هيجنز أن الضوء هو موجة ، أى هو انتقال للطاقة لا للمادة . ولقد رأينا أن نظرية الجسيمات تفسر كثيراً من الحقائق المشاهدة . هل تؤدى النظرية الموجية نفس المهمة ؟ يجب أن نسـأل نفس الأسئلة التى أجيب عليها بواسطة نظرية الجسيمات وذلك لـكى نرى هل يمكن الإجابة عليها بواسطة النظرية الموجية أيضاً . وسنفعل ذلك هنا فى صـورة حوار بين ﻫ ، ﻫ حيث ﻫ شخص يعتقد بصحة نظرية نيوتن، ﻫ شخص يعتقد بصحة نظرية هيجنز . ولن يستعمل أيهما أى نتائج حصل عليها بعد انتهاء عمل هذين العالمين الفذين :

ﻫ — فى نظرية الجسيمات يوجد معنى محـدد تماماً لسرعة الضوء ، فهى السرعة التى تسير بها الجسيمات فى الفراغ المطلق . ولـكن ماذا نعنى بسرعة الضوء فى النظرية الموجية ؟ .

ﻫ — فى النظرية الموجية تـكون سرعة الضوء هى سرعة موجة الضوء ، فمن المعلوم أن كل موجة تنتشر بسرعة معينة . وهذا يسرى على موجة الضوء أيضاً .

ﻫ — رغم أن هـذا الـكلام يبدو بسيطاً فهو ليس كذلك . فموجات الصوت تسير فى الهواء ، وموجات المحيط تسير فى الماء ولا بد لـكل موجة من وسط مادى تسير فيه ولـكن الضوء يسير فى الفراغ المطلق رغم عدم إمكان سير الصوت فيه . وفى الواقع أن فرض سير الموجة فى الفراغ المطلق يعنى عدم فرض وجود موجات على الإطلاق .

ﻫ — نعم هذه صعوبة ولـكنها ليست جديدة على . لقد فـكر أستاذى فيها جيداً ووجد أن الطريقة الوحيدة للتخلص من هذه الصعوبة ، هو : نفرض وجود شىء مادى « الأثير » شفاف وينفذ خلال الـكون كله . وبمجرد أن توجد لدينا الشجاعة لإدخال هذه الفـكرة فإن كل شىء آخر يصبح واضحاً ومقنعاً .

ﻫ — ولـكنى أعترض على مثل هذا الفرض . فأولا بهذا الفرض ندخل

شيئاً مادياً جديداً مع أن لدينا كثيراً من هذه الأشياء فى علم الطبيعة . ويوجد سبب آخر للاعتراض . فأنت دون شك تعتقد بوجوب تفسير كل شيء بدلالة الميكانيكا ، ولكن ماذا عن الأثير ؟ هل يمكن الإجابة على السؤال البسيط الآتى : كيف يتركب الأثير من جسيمات صغيرة أولية وكيف يظهر فى الظواهر الأخرى ؟

هـ — من المؤكد أن اعتراضك الأول وجيه . ولكن بإدخال الأثير الذى لا وزن له ، وهو مصطنع إلى حد ما ، نتخلص على الفور من فكرة جسيمات الضوء وهى فكرة أكثر بعداً عن الحقيقة ، ويصبح لدينا شيء واحد بدلا من عدد لا نهائى من هذه الموجودات التى تناظر العدد الكبير من الألوان الموجودة فى الطيف . ألا تظن أن هذا تقدم حقيقى ؟ على الأقل تكون جميع الصعوبات قد تركزت فى نقطة واحدة . بهذا الفرض نستغنى عن الفرض الغريب وهو أن جسيمات ألوان الضوء المختلفة تسير بنفس السرعة فى الفراغ المطلق . وحجتك الثانية صحيحة أيضاً . لا يمكن إعطاء تفسير ميكانيكى للأثير . ولكن لا يوجد أدنى شك فى أن الدراسة المستفيضة للظواهر الضوئية وغيرها من الظواهر الأخرى ستكشف عن تركيب الأثير . وفى الوقت الحالى يجبُ علينا أن ننتظر تجارب جديدة ونتائج جديدة ، وأخيراً أرجو أن نوفق فى التغلب على صعوبة تفسير التركيب الميكانيكى للأثير .

م — لنترك هذا السؤال الآن لعدم إمكان الإجابة عليه إجابة محددة . أود أن أعلم كيف تتمكن بواسطة نظريتك من تفسير الظواهر التى تتضح ويمكن فهمها بواسطة نظرية الجسيمات . اعتبر مثلا ظاهرة سير أشعة الضوء فى الفراغ أو فى الهواء فى خطوط مستقيمة . إذا وضعنا ورقة أمام شمعة فإن ظلها يكون واضحاً وحادا تماماً . إذا كانت النظرية الموجية للضوء صحيحة ، فإنه يتعذر الحصول على ظلال محددة ، وذلك لأن الموجات تنثنى حول أحرف الورقة وتشوه الظل . وكما تعلم لا يعتبر قارب صغير عقبة أمام أمواج البحر ، فهى تنثنى حوله ببساطة دون أن تحدث ظلاً .

هـ — ليست هذه بحجة مقنعة . اعتبر حالة موجات قصيرة على نهر تقابل

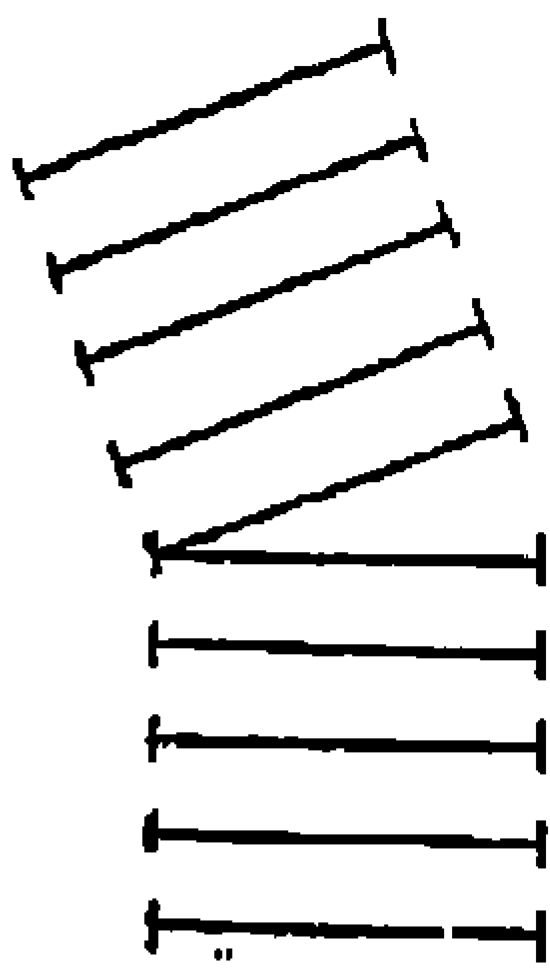
جانب سفينة كبيرة . لا تظهر الموجات الناشئة على أحد جانبي السفينة فى الجانب الآخر . وإذا كانت الموجات صغيرة والسفينة كبيرة بدرجة كافية فإنه يظهر ظل واضح . ومن المحتمل جداً أن الضوء يظهر فقط كأنه يسير فى خطوط مستقيمة لأن طول موجته صغير جداً بالنسبة إلى حيز الأجسام العادية والثقوب المستخدمة فى التجارب . ومن الجائز أن يظهر الظل إذا أمكننا إيجاد عقبة صغيرة صغراً كافياً . وسنقابل صعوبات عملية كبيرة إذا حاولنا تصميم جهاز يبين ما إذا كان الضوء ينحنى أم لا . ومع ذلك فإنه إذا أمكن تصميم مثل هذه التجربة فإنها تكون تجربة حاسمة بين النظرية الموجية ونظرية الجسيمات للضوء .

ﻫ — قد تؤدى النظرية الموجية إلى حقائق جديدة فى المستقبل ، ولكنى لا أعلم عن أية أحصائيات وجدت بالتجربة تتفق مع هذه النظرية بطريقة مقنعة . ومادام لم يثبت بالتجربة إمكان انحناء الضوء فإنى لا أجد ما يمنع الاعتقاد بصحة نظرية الجسيمات ، وهى فى نظرى أبسط من النظرية الموجية ، وعلى ذلك فهى أفضل .

سنقطع هذه المحادثة عند هذه النقطة رغم أن الموضوع لا يزال يستوجب الدراسة .

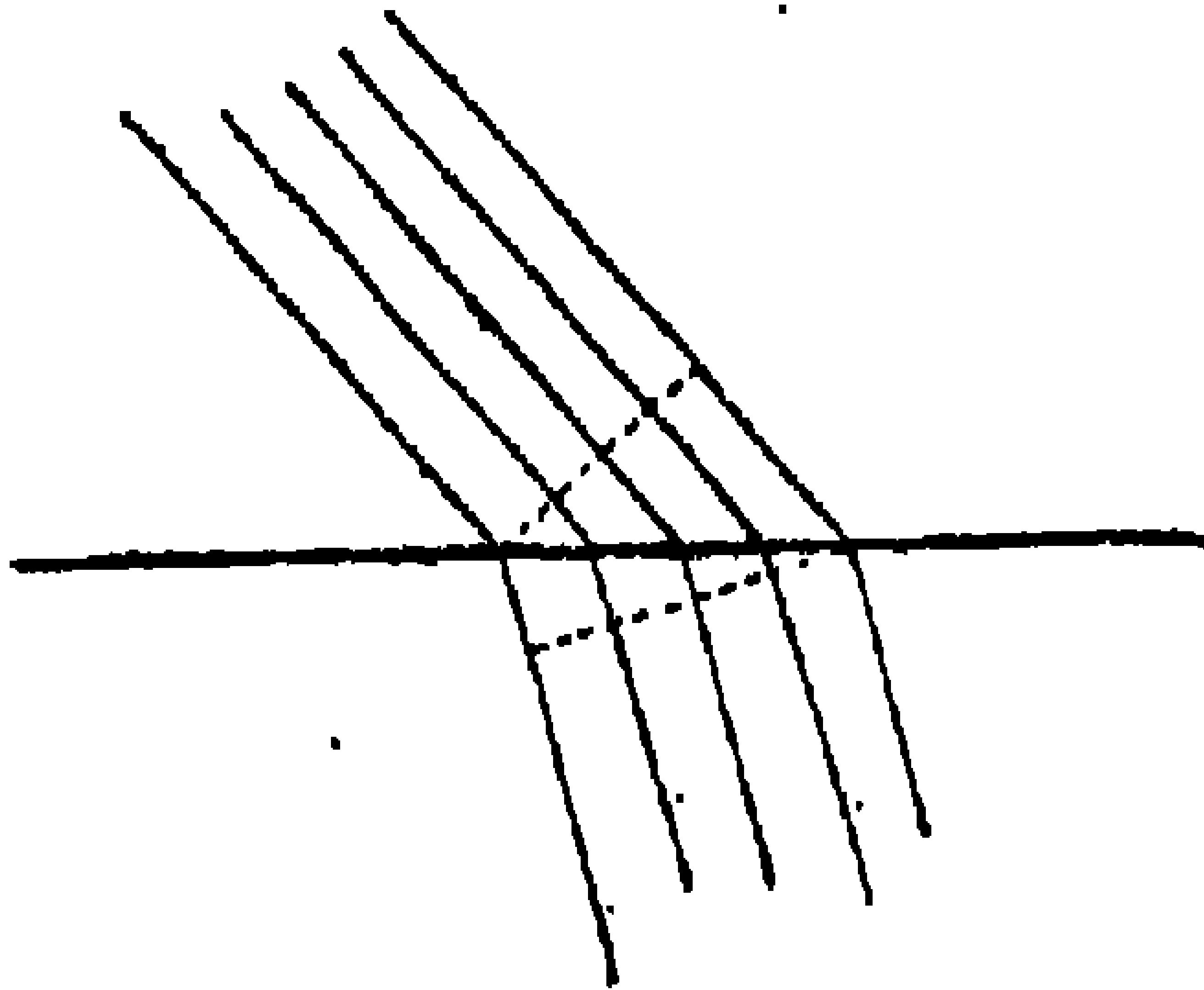
يبقى أن نبين كيف تفسر النظرية الموجية انكسار الضوء والألوان المختلفة . وكما نعلم ، تمكننا نظرية الجسيمات من تفسير هذه الظواهر . سنبدأ أولا بالانكسار وسيكون من المفيد أن نعتبر مسألة لا علاقة لها بعلم البصريات .

اعتبر رجلين يسيران فى طريق ممتد ويحملان عصاً مستقيمة بينهما . ونفرض أن الرجلين كانا يسيران أولا بنفس السرعة إلى الأمام . ما دامت سرعة الرجلين واحدة ، صغيرة كانت أم كبيرة ، فإن العصا تعانى إزاحات متوازية ، أى أن اتجاهها لا يتغير . وتكون جميع أوضاع العصاة موازية لوضعها الابتدائى . نفرض أن حركة الرجلين اختلفت فى فترة زمنية معينة (قد تكون هذه الفترة صغيرة مثل جزء من الثانية) . ماذا يحدث ؟ من الواضح أن العصا تدور فى أثناء هذه الفترة . أى أن إزاحاتها لا تكون موازية لوضعها الأول . وإذا سار الرجلان مرة أخرى بسرعة واحدة فإن اتجاه العصا الجديد يكون مخالفاً لاتجاهها الأول .



والرسم يبين ذلك بوضوح . وقد حدث التغير فى الاتجاه أثناء الفترة الزمنية التى اختلفت فيها سرعة الرجلين .

سيمكننا هذا المثال من فهم معنى انـكسار الموجة . لنفرض أن موجة مستوية تسير فى الأثير قد قابلت لوحاً من الزجاج . نرى فى الرسم التالى موجة لها جبهة عريضة نسبياً ، أثناء انتشارها . وجبهة الموجة هى مستوى تكون حالة جميع أجزاء الأثير عليه واحدة عند أى لحظة معينة . وحيث أن السرعة تعتمد على الوسط الذى يمر فيـه الضوء فإن سرعة الضوء فى الزجاج تختلف عن سرعته فى الفراغ المطلق . وفى خلال الفترة الزمنية القصيرة جـداً التى تدخل فيها جبهـة الموجة الزجاج ، تختلف سرعة الأجزاء المختلفة من هذه الجبهة . إذ أنه من الواضح أن الجزء الذى يكون قد دخل الزجاج يسير بسرعة الضوء فى الزجاج بينما يسير الجزء الباقى بسرعة الضوء فى الأثير . ونتيجة لاختلاف سرعة أجزاء جبهة الموجة خلال فترة « الانغماس » فى الزجاج يتغير اتجاه الموجة نفسها .



على ذلك نرى أن النظرية الموجية ، مثل نظرية الجسيمات ، تؤدى إلى تفسير لظاهرة الانـكسار . بالتعمق فى الدراسة مع الاستعانة بعلم الرياضة تتبين أن تفسير النظرية الموجية أبسط وأفضل وأن نتائجها تتفق تماماً مع المشاهـدة . وفى الواقع تمـكننا الطرق الـكميـة المنطقية من استنتاج سرعة الضوء فى وسط يكسره إذا علمنا الـكيفية التى ينكسر بها الشعاع عند مروره فى الوسط .

تبقى الآن مسألة اللون .

يجب أن نتذكر أن ما يميز موجة هما عددان ، سرعتها وطول موجتها . والفرض الأساسى فى النظرية الموجية للضوء هو أن أطوال الموجات المختلفة تناظر ألواناً مختلفة . فيختلف طول موجة الضوء الأحمر عن طول موجة الضوء البنفسجى . وهكذا بدلاً من الفرض الذى يصعب قبوله والذى يقول بأن كل لون له جسيمات معينة ، لدينا الآن الاختلاف الطبيعى فى أطوال الموجات .

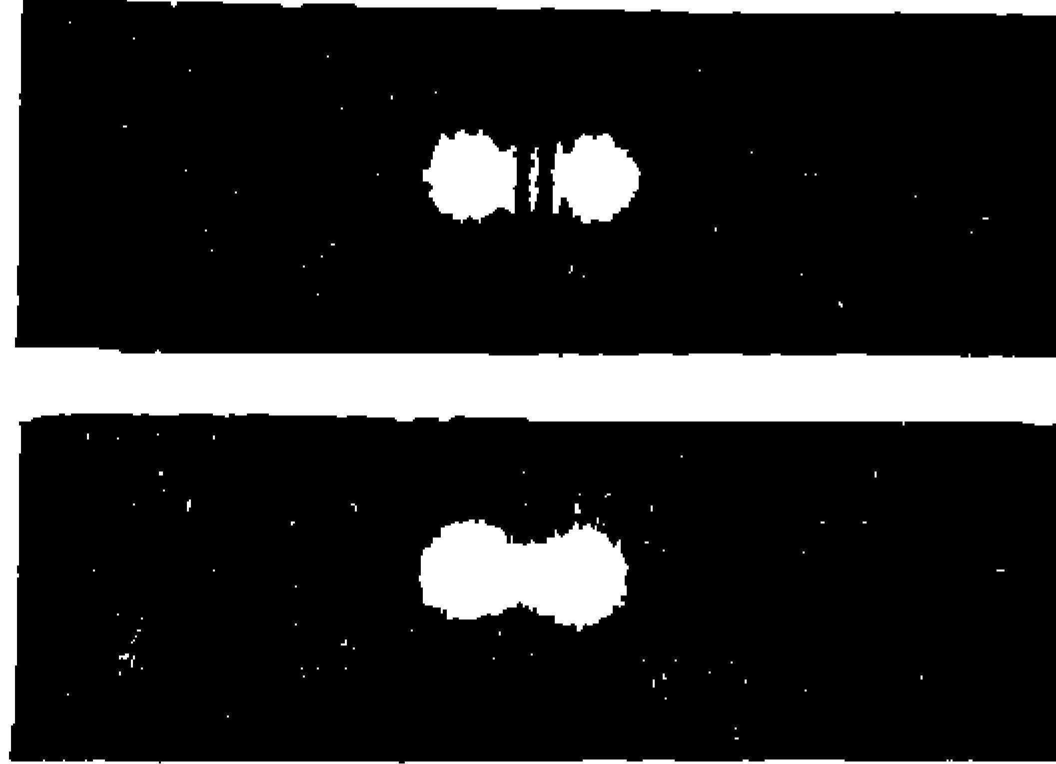
على ذلك نستطيع وصف تجارب نيوتن فى تشتت الضوء بلغتين مختلفتين ، لغة نظرية الجسيمات ، ولغة النظرية الموجية ، فمثلاً :

لغة الجسيمات	لغة الموجة
تسير جسيمات الألوان المختلفة بسرعة واحدة فى الفراغ وبسرع مختلفة فى الزجاج .	الأشعة التى أطوال موجاتها مختلفة والتى تشير إلى مختلف الألوان تسير بنفس السرعة فى الأثير وبسرع مختلفة فى الزجاج .
يتركب الضوء الأبيض من جسيمات الألوان المختلفة وتتفرق هذه الجسيمات فى الطيف .	يتركب الضوء الأبيض من جميع الأمواج ذات الأطوال المختلفة وتفترق هذه الموجات فى الطيف .

ويبدو أنه من المستحسن تجنب الالتباس الناشىء من وجود نظريتين مختلفتين لنفس الظواهر وذلك باختيار واحدة منهما بعد دراسة مزايا وأخطاء كلا منهما جيداً . وتبين لنا المحادثة بين م ، هـ أن هذا العمل ليس سهلاً على الاطلاق . ويكون القرار عند هذه النقطة مسألة اختيارية تختلف من شخص لآخر ولن يكون ناتجاً عن اقتناع علمى ، وقد فضل أغلب العلماء فى عهد نيوتن وبعده بأكثر من مائة عام نظرية الجسيمات .

وبعد ذلك بزمن طويل ، فى منتصف القرن التاسع عشر جاء حكم التاريخ فى صالح النظرية الموجية ضد نظرية الجسيمات . لقد قال هـ فى محادثته مع م أن

اللوحة الثانية

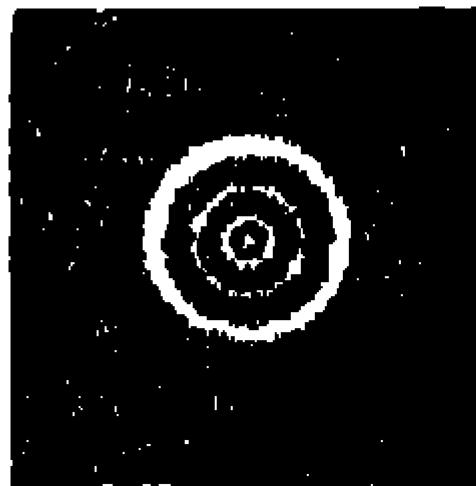


(أخذ الصورة ف . اركاديف)

فى الصورة الفوتوغرافية العليا نرى بقعتين ضوئيتين نتجتا عن مرور حزمتين من الأشعة خلال ثقبى دبوس على التوالى . (أى أن أحد الثقبين فتح أولاً ثم غطى بعد ذلك وفتح الآخر) . فى الصورة السفلى نرى شرائح رأسية نتجت عن مرور الضوء فى وقت واحد خلال الفتحتين .



حيود الضوء بانثنائه حول عقبة صغيرة



حيود الضوء المار خلال ثقب صغير

(أخذ الصورتان ف . اركاديف)

الحسم بين النظريتين بالتجربة ممكن من ناحية المبدأ . فنظرية الجسيمات لا تسمح للضوء بالانحناء وتتطلب وجود ظلال حادة . أما حسب النظرية الموجية فإن عقبة صغيرة صغراً كافياً لا تسبب ظلاً ، وقد حقق يونج وفرينيل هذه الحقيقة عملياً كما حصلوا على نتائج نظرية .

سبق أن وصفنا تجربة بسيطة للغاية ، يوضع فيها حاجز به ثقب أمام مصدر ضوئى وبذلك يظهر ظل على الحائط . سنبسط التجربة أكثر وذلك بفرض أن المصدر الضوئى يشع ضوءاً متجانساً ، ولكى نحصل على نتائج جيدة يجب أن يكون المصدر الضوئى قوياً . لنفرض الآن أن الثقب الموجود فى الستارة قد أخذ يصغر تدريجياً . إذا استعملنا مصدراً ضوئياً قوياً وأفلحنا فى جعل الثقب صغيراً بدرجة كافية فإننا نشاهد ظاهرة جديدة غريبة لا يمكن تفسيرها بنظرية الجسيمات . لن نجد أى تحديد ظاهر بين الضوء والظلام . سنشاهد حول البقعة المضيئة أن الضوء يخفت تدريجياً فى المنطقة المظلمة مع ظهور سلسلة من الحلقات المضيئة والمظلمة . وظهور الحلقات هو من أخص مميزات أية نظرية موجية . ويتضح تفسير توالى المناطق المضيئة والمظلمة من تجربة أخرى تختلف بعض الشيء عن التجربة السابقة . نفرض أن لدينا ورقة مظلمة بها ثقبا دبوس يمكن للضوء المرور منهما . إذا كان الثقبان قريبين من بعضهما وصغيرين جداً ، وكان مصدر الضوء المتجانس قوياً فإن كثيراً من الشرائط المضيئة والمظلمة تظهر على الحائط وتخفت تدريجياً فى الظلام عند الجوانب . وتفسير ذلك بسيط ، يوجد الشريط المظلم فى المكان الذى يقابل فيه قاع موجة منبعثة من الثقب الأول قمة موجة منبعثة من الثقب الثانى وذلك لأنهما يتعادلان . ويوجد الشريط المضيء فى المكان الذى يتقابل فيه قمتان (أو قاعان) من الثقبين ، إذ تقويان بعضهما . وتفسير الحلقات المضيئة والمظلمة فى حالة وجود ثقب واحد أكثر تعقيداً منه فى المثال السابق ، ولكن الفكرة واحدة . ويجب أن نتذكر ظهور الشرائط المضيئة والمظلمة فى حالة وجود الثقبين والحلقات المضيئة والمظلمة فى حالة وجود ثقب واحد جيداً وذلك لأننا سنعود إلى دراسة هاتين الصورتين المختلفتين فيما بعد .

والتجربة التى وصفناها هنا تبين حيود الضوء أى الانحراف عن السير فى خطوط مستقيمة عند مقابلة موجة الضوء لثقوب أو عقبات صغيرة .

بالاستعانة بقليل من الرياضة ، يمكن أن نذهب إلى أبعد من ذلك بكثير فمن الممكن تحديد درجة صغر طول الموجة التى نحصل بها على نموذج معين للحلقات . وعلى ذلك تمكننا التجارب التى شرحناها هنا من قياس طول موجة الضوء المتجانس المستعمل كمصدر . ولكى نعطى القارىء فكرة عن درجة صغر هذه الأعداد سنذكر طولى موجتى الضوء الأحمر والبنفسجى وهما اللونان المحددان لطيف الشمس:

طول موجة الضوء الأحمر ٠,٠٠٠٠٨ سم

« « « البنفسجى ٠,٠٠٠٠٤ «

يجب ألا ندهش لصغر هذه الأعداد ، ونحن نشاهد ظاهرة الظل المحدد (أى ظاهرة سير الضوء فى خطوط مستقيمة) فى الطبيعة لأن حيز العقبات والثقوب يكون فى العادة كبيراً جداً بالنسبة إلى طول موجة الضوء . ولا تظهر الصفات الموجية للضوء إلا باستعمال عقبات وثقوب صغيرة جداً .

ولكن يجب ألا يعتقد القارىء أن قصة البحث عن نظرية للضوء قد انتهت . لم يكن حكم القرن التاسع عشر نهائياً ، فلا تزال مشكلة الحسم بين الجسيمات والموجات موجودة بأكملها أمام عالم الطبيعة الحديث ، والمشكلة الآن أكثر عمقاً وتداخلا . فلنقبل هزيمة نظرية الجسيمات للضوء إلى أن نرى المشاكل التى تنتج عن انتصار النظرية الموجية .

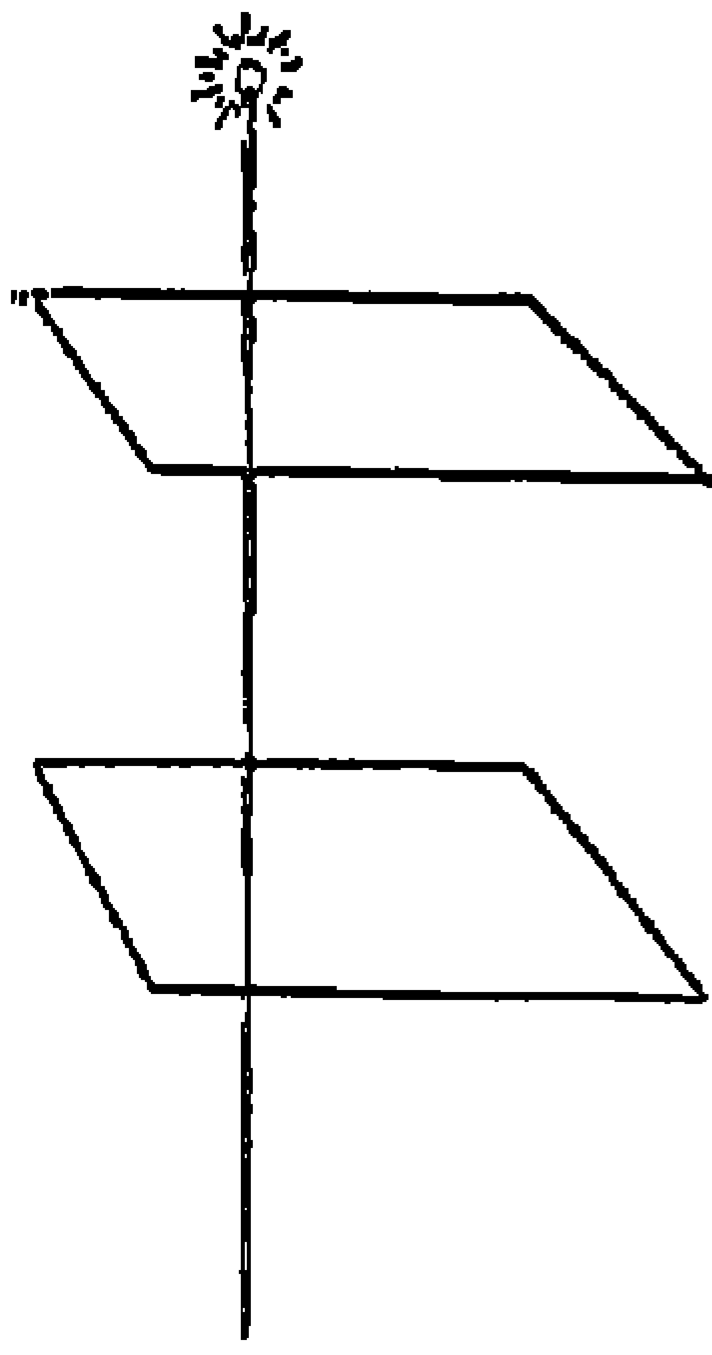
هل موجات الضوء طولية أم مستعرضة ؟

تؤيد جميع الظواهر البصرية التى تكلمنا عنها النظرية الموجية . وأقوى حجتين تؤيدان هذه النظرية هما انحناء الضوء حول العقبات الصغيرة وتفسير الانكسار . ولكن تبقى مشكلة أخرى لم تحل بعد ، ألا وهى تحديد الخواص الميكانيكية للأثير . ولحل هذه المشكلة يجب أن نعلم هل موجات الضوء فى الأثير طولية أم مستعرضة . ويمكن أيضاً وضع هذا السؤال كما يأتى : هل انتقال الضوء يماثل انتقال الصوت ؟

هل تحدث الموجة نتيجة لتغيرات فى كثافة الوسط وبذلك تكون ذبذبات الجسيمات فى اتجاه سير الضوء ؟ أم هل يشبه الأثير مادة غروية مرنة وبذلك لا تنشأ فيه إلا موجات مستعرضة وتسير جسيماته فى اتجاه عمودى على اتجاه سير الموجة ؟

قبل دراسة هذه المسألة ، سنحاول أن نفكر فى الحل المناسب الذى سنختاره . من الواضح أننا نكون أسعد حظاً لو كانت موجات الضوء طولية ، وذلك لأن صعوبات تكوين أثير ميكانيكى تكون أبسط فى هذه الحالة . ومن الجائز جداً أن تكون الصورة التى ترسمها للأثير شبيهة بالصورة الميكانيكية للغازات وهى الصورة التى تفسر انتقال موجات الصوت . وتخيل وجود موجات مستعرضة فى الأثير أصعب من ذلك بكثير . وليس من السهل تكوين صورة لمادة غروية مكونة من جسيمات بحيث تنشأ عنها موجات مستعرضة . وكان هيجنز يميل إلى الاعتقاد بأن الأثير يشبه « الهواء » أكثر من «الغراء» ، ولكن الطبيعة لا تهتم كثيراً بما نطلبه ونحدده . هل أشفقت الطبيعة فى هذه الحالة بعلماء الطبيعة الذين يحاولون فهم جميع الأحداث من وجهة نظر ميكانيكية ؟ للاجابة على هذا السؤال تلزم دراسة تجارب جديدة .

سندرس بالتفصيل تجربة واحدة فقط من بين التجارب الكثيرة التى تستطيع أن تجيبنا على هذا السؤال . نفرض أن لدينا لوحاً رفيع جداً من التورمالين المتبلور ومقطوع بشكل معين لا داعى لوصفه هنا . يجب أن يكون اللوح المتبلور رفيعاً لنتمكن من رؤية الضوء خلاله . خذ الآن لوحين من هذا النوع وضعهما بين العينين وبين الضوء . ماذا ننتظر أن نرى ؟ مرة أخرى نقطة ضوئية إذا كان اللوح رفيعاً بدرجة كافية . فى أغلب الأحيان تحقق التجربة ما ننتظره ، أى أننا نرى النقطة الضوئية خلال البلورتين . نغير بعد ذلك وضع إحدى البلورتين بإدارتها . وطبعاً لا يتحدد معنى هذه العبارة إلا إذا عين محور الدوران . سنأخذ الشعاع الساقط محوراً للدوران . ويكون معنى الدوران أننا نغير موضع نقط البلورة ما عدا النقط الواقعة على المحور . يحدث شىء غريب ! يخفت الضوء



تدريجياً إلى أن يتلاشى فى النهاية ، ثم يظهر ثانية إذا استمر الدوران ونستعيد المنظر الأول عندما نصل إلى الوضع الابتدائى . يمكننا أن نسأل السؤال الآتى دون أن ندخل فى تفاصيل هذه التجربة وما يشابهها من التجارب : هل يمكن تفسير هذه الظواهر إذا كانت موجات الضوء طولية ؟ فى حالة الموجات الطولية تتحرك جسيمات الأثير فى اتجاه المحور، مثلها فى ذلك مثل الشعاع . إذا أديرت البلورة حول المحور لا يتغير أى شىء على هذا المحور . النقط الموجودة على المحور لا تتحرك ولا يعانى الجوار المباشر للمحور إلا إزاحة صغيرة جداً . وإذن فى حالة الموجة الطولية ، لا يمكن أن يحدث تغيير واضح مثل اختفاء وظهور الصورة . ويمكن تفسير هذه الظاهرة ومثيلاتها من الظواهر الأخرى إذا فرضنا أن موجات الضوء مستعرضة وليست طولية ! أى إذا فرضنا أن للأثير صفة المواد الغروية .

وهذا أمر يؤسف له ، ويجب أن نستعد لمواجهة صعوبات كبيرة فى محاولتنا وصف الأثير ميكانيكياً .

الأثير ووجهة النظر الميكانيكية :

إن دراسة جميع محاولات فهم الخواص الميكانيكية للأثير كوسط يمر الضوء فيه تحتاج إلى وقت طويل . ومعنى التركيب الميكانيكى كما نعلم هو أن الشىء المادى يتكون من جسيمات تؤثر فى الخطوط الواصلة بينها قوى تتوقف على البعد فقط . ولكى يوضع تصميم للأثير كشىء مادى شبيه بالغراء ، كان على علماء الطبيعة أن يفرضوا فروضاً جد مفتعلة وغير طبيعية . ولن نذكر هذه الفروض هنا فهى تنتسب إلى الماضى البعيد . ولكن النتيجة كانت هامة وذات مغزى .. لقد كانت الصفات الغريبة لجميع هذه الفروض وضرورة الأخذ بكثير منها كل مستقل عن الآخر ، كافياً لزعزعة الاعتقاد فى وجهة النظر الميكانيكية .

ولكن هناك اعتراضات أخرى ضد الأثير أبسط من صعوبة تكوينه . يتحتم أن يوجد الأثير فى كل مكان إذا كنا نريد تفسير الظواهر البصرية ميكانيكيا . وإذا كان الضوء لا يسير إلا فى وسط فإنه لا يوجد فى أى فراغ خالى . ولكننا نعلم من الميكانيكا أن الفراغ الموجود بين المجموعة الشمسية لا يقاوم حركة الأجسام المادية . فمثلا تتحرك الكواكب خلال الأثير الفروى دون أن تصادف مقاومة على خلاف ما يحدث عندما تتحرك فى أى وسط مادى آخر . وإذا كان الأثير لا يقاوم حركة المادة فإننا نستنتج أنه لا يوجد تفاعل بين جسيمات الأثير وجسيمات المادة . يمر الضوء خلال الأثير كما يمر خلال الزجاج والماء ، ولكن سرعته تتغير فى المادتين الأخيرتين ؛ فكيف يمكن تفسير هذه الحقيقة ميكانيكياً ؟ من الواضح أنه لا يمكن تفسيرها إلا بفرض وجود تفاعل ما بين جسيمات الأثير وجسيمات المادة . ولكننا رأينا منذ برهة ، أنه فى حالة حركة الحرة يجب أن نفترض عدم وجود مثل هذا التفاعل . أى أنه يوجد تفاعل بين الأثير والمادة فى الظواهر الضوئية ولا يوجد أى تفاعل بينهما فى الظواهر الميكانيكية ! ومن المؤكد أن هذه نتيجة تناقض نفسها .

يبدو أن هناك طريقاً واحداً للخلاص من هذه الصعوبات . فى جميع مراحل تطور العلم حتى القرن العشرين ، نجد أنه لمحاولة فهم ظواهر الطبيعة على أساس ميكانيكى لا بد من إدخال كثير من المواد المصطنعة وغير الواقعية مثل الموائع الكهربائية والمغناطيسية وجسيمات الضوء والأثير . ونتيجة لهذا تتركز جميع الصعوبات فى عدد قليل من النقط الأساسية ، مثل الأثير فى حالة الظواهر الضوئية ، إذ يبدو هنا أن جميع المحاولات غير المثمرة لتفسير الأثير تفسيراً بسيطاً وكذلك الاعتراضات الأخرى تشير إلى أن الخطأ ناشىء عن الفرض الأساسى بإمكان تفسير جميع أحداث الطبيعة من وجهة النظر الميكانيكية . ولم ينجح العلم فى إتمام البرنامج الميكانيكى بطريقة مرضية ، ولا يوجد الآن عالم من علماء الطبيعة يعتقد بإمكان إتمامه .

فى استعراضنا للأفكار الطبيعية الأساسية قابلتنا بعض المشاكل التى لم تحل ، وصعوبات وعقبات ثبطت همتنا فى محاولة تكوين صورة منتظمة متماسكة

لظواهر العالم الخارجي . فمثلا في الميكانيكا الكلاسيكية ، كان هناك الدليل الذي لم يلاحظ وهو تساوي كتلتي القصور الذاتي والجاذبية ، كما كانت هناك الصفة المصطنعة للموائع الكهربائية والمغناطيسية ، والقوة التي تؤثر بين التيار الكهربائي والإبرة المغناطيسية وهي صعوبات لم تحل ، ويذكر القارىء أن هذه القوة لم تؤثر في الخط الواصل بين السلك والقطب المغناطيسي وأنها كانت تتوقف على سرعة الشحنة المتحركة . وكان القانون الذي يعبر عن قيمتها واتجاهها معقداً للغاية . وأخيراً كانت هناك عقبة الأثير الكبرى .

لقد هاجم علم الطبيعة الحديث جميع هذه المشاكل وحلها . ولكن أثناء صراعه لحلها ، نشأت مشاكل جديدة وعويصة . فكما أن معلوماتنا الآن أوسع وأشمل من معلومات علماء الطبيعة في القرن التاسع عشر فإن صعوباتنا وشكوكنا أكثر .

تلخيص :

نلاحظ في نظرية الموائع الكهربائية القديمة وفي نظرية الجسيمات والنظرية الموجية محاولات أخرى لتطبيق وجهة النظر الميكانيكية . ولكننا نقابل صعوبات شديدة في تطبيق وجهة النظر الميكانيكية للظواهر الكهربائية والبصرية .

إذا أثرت شحنة متحركة على إبرة مغناطيسية فإن القوة بدلاً من أن تتوقف على البعد فقط تعتمد أيضاً على سرعة الشحنة . والقوة ليست جاذبة ولا طاردة وإنما تؤثر في اتجاه عمودي على الخط الواصل بين الشحنة والإبرة .

في علم البصريات يجب علينا أن نقرر تفضيل النظرية الموجية على نظرية الجسيمات للضوء . من المؤكد أن فكرة انتشار الموجات في وسط يتكون من جسيمات تؤثر بينها قوى هي فكرة ميكانيكية . ولكن ماهو الوسط الذي ينتشر فيه الضوء وما هي خواصه الميكانيكية ؟ ليس هناك أي أمل في اختصار الظواهر الضوئية إلى ظواهر ميكانيكية دون الإجابة على هذا السؤال . ولكن صعوبات الإجابة على هذا السؤال عظيمة جداً ولذلك سنضطر إلى تركه وترك وجهة النظر الميكانيكية أيضاً .

الباب الثالث

المجال — النسبية

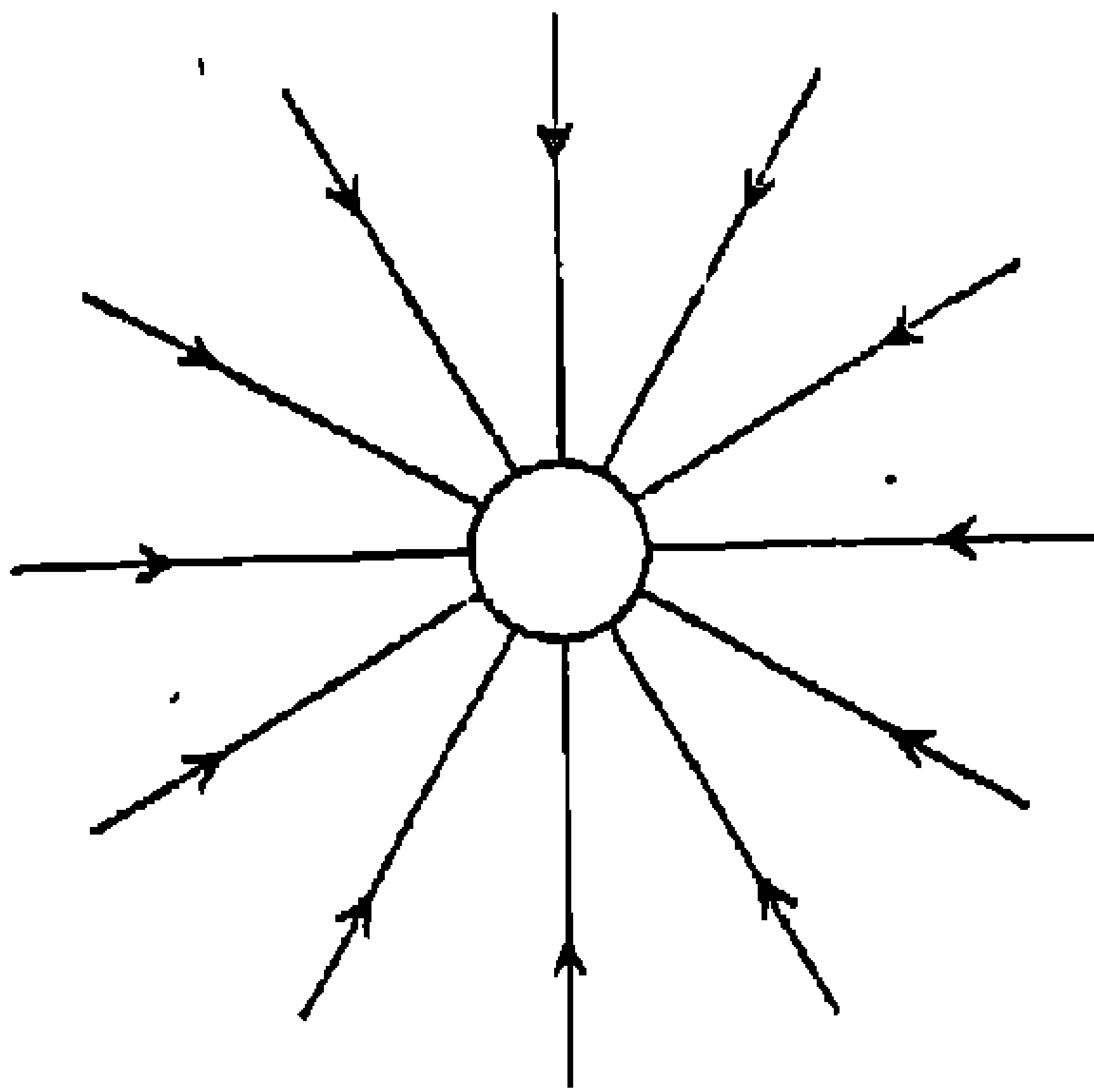
[المجال كوسيلة لتمثيل الواقع — دعامتا نظرية المجال — واقعيـة المجال — المجال والأثير — السقالة الميكانيكية — الأثير والحركة — الزمن والمسافة والنسبية — نظرية النسبية والميكانيكا — متصل الزمان والمكان — النسبية العامة — خارج وداخل المصعد — الهندسة والتجربة — النسبية العامة وتحقيقها — المجال والمادة] .

المجال كوسيلة لتمثيل الواقع :

لقد أدخلت أفكار جديدة وثورية فى علم الطبيعة خلال النصف الثانى من القرن التاسع عشر . وقد مهدت هذه الأفكار الطريق إلى اتجاه فلسفى جديد يختلف عن وجهة النظر الميكانيكية . ولقد ولدت مبادئ جديدة نتيجة لأبحاث فاراداى ومكسويل وهرتز وكونت هذه المبادئ صورة جديدة للحقيقة .

ومهمتنا الآن هى وصف الأثر الذى أحدثته هذه المبادئ الجديدة فى العلم ، وأن نبين كيف قويت واتضحت هذه المبادئ . وسنحاول شرح تطور هـذه الأفكار بطريقة منطقية دون أن نهتم كثيراً بالترتيب التاريخى .

لقد نشأت المبادئ الجديدة عن الظواهر الكهربائية ولـكن من الأبسط أن ندخلها عن طريق الميكانيكا . إذا كان لدينا جسمان فإننا نعلم أنهما يجذبان بعضهما وأن قوة الجذب هذه تتناسب عكسياً مع مربع البعد . يمكننا تمثيل هذه الحقيقة بطريقة جديدة ، وسنفعل ذلك رغم صعوبة فهم مميزات ذلك . تمثل الدائرة الصغيرة فى الرسم جسما جاذباً ، الشمس مثلا . والواقع أن هذه المجموعة هى مجموعة فراغية وليست رسماً فى مستو . فالدائرة الصغيرة تمثل كرة فى الفراغ الشمسى مثلا .



إذا وجد جسم (يسمى جسم اختبار) فى جوار الشمس فإنه ينجذب لها بقوة خط عملها هو الخط الواصل بين مركزى الجسمين . وعلى ذلك تمثل الخطوط الموجودة فى الرسم اتجاه قوة جذب الشمس لأوضاع جسم الاختبار المختلفة . ويبين السهم الموجود على كل خط أن القوة متجهة نحو الشمس . تسمى هذه المستقيمات خطوط قوة مجال الجاذبية "، وسنعتبر هذا فى الوقت الحاضر إسماً ولا داعى لبحث هذه التسمية الآن . وتوجد خاصية مميزة للرسم السابق سنوضح أهميتها فيما بعد وهى أن جميع خطوط القوة موجودة فى الفراغ حيث لا توجد مادة . ومؤقتاً تبين جميع خطوط القوة أو المجال كيف يسلك جسم الاختيار إذا اقترب فقط من الكرة (صاحبة المجال) ".

فى هذا التمثيل الفراغى ، جميع الخطوط عمودية على سطح الكرة . وحيث أنها جميعاً تتفرق من نقطة واحدة ، فإنها تكون كثيفة بالقرب من الكرة ويقل تكاثفها كلما زاد البعد عن الكرة . وإذا ازداد البعد عن الكرة إلى ضعفه أو ثلاثة أمثاله فإن تكاثف الخطوط فى التمثيل الفراغى (رغم عدم صحة ذلك فى الشكل المستوى) يقل إلى الربع أو التسع على التوالى . أى أن هذه الخطوط تؤدى غرضين . فهى تبين اتجاه القوة المؤثرة على الجسم الموجود فى جوار الكرة التى تمثل الشمس ، كما أن تكاثف هذه الخطوط فى الفراغ يبين العلاقة بين القوى والبعد .

وإذا فسر المجال تفسيراً صحيحاً فإنه يمثل اتجاه قوة الجاذبية وعلاقتها بالبعد . ويمكن للانسان أن يقرأ قانون الجاذبية من مثل هذا الرسم كما يقرأه من الوصف بالكلام أو بلغة الرياضة المضبوطة الاقتصادية . قد يكون التمثيل بالمجال واضحاً وذا أهمية ، ولكن لا يوجد أى سبب يجعلنا نعتقد أنه يدل على أى تقدم حقيقى . ومن الصعب جداً إثبات فائدة هذا التمثيل فى حالة الجاذبية . وقد يجد البعض أنه من

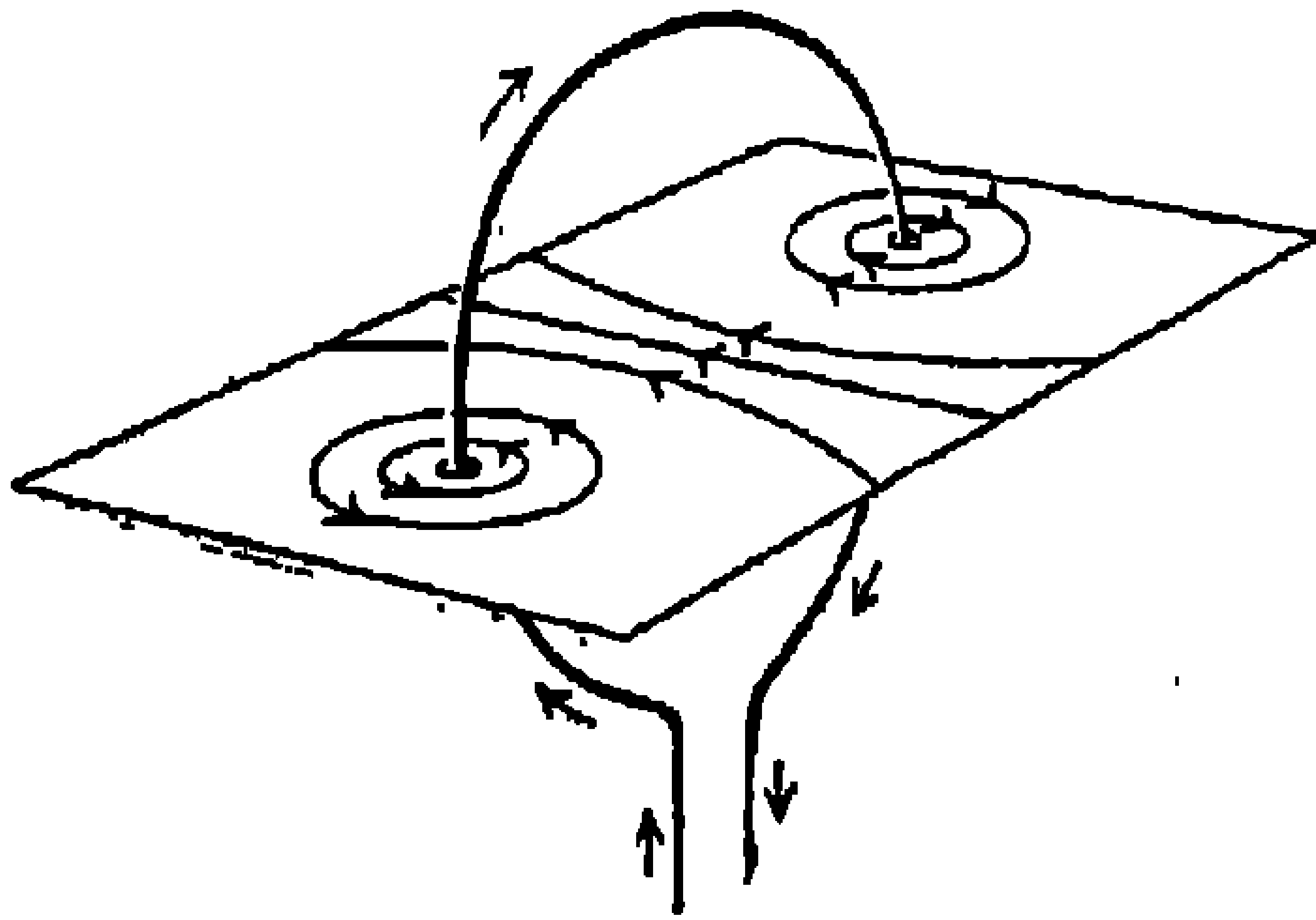
المفيد عدم اعتبار هذه الخطوط على أنها رسوم فقط وأن يتخيلوا التأثير الحقيقى للقوى التى تعمل فيها . يمكن القيام بذلك ولـكن يتحتم الفرض بأن التأثير فى هذه الخطوط له سرعة لا نهائية . فحسب قانون نيوتن لا تتوقف القوة إلا على البعد فقط ولا علاقة لها بالزمن . أى أن القوة يجب ألا تحتاج إلى وقت لتصل من جسم لآخر . ولـكن حيث أن الحركة بسرعة لا نهائية لا تعنى أى شىء بالنسبة إلى شخص مدرك فإن محاولة اعتبار الرسم السابق شيئاً أكثر من نموذج لا تؤدى إلى شىء بالمرة .

ونحن لا نريد بحث مسألة الجاذبيـة الآن . وهى فقط مقدمة تبسط شرح الطرق المماثلة فى نظرية الـكهرباء .

سنبدأ بدراسة التجربة التى ولدت صعوبات جدية فى تفسيرنا الميكانيكى . كان لدينا تيار ينساب فى سلك دائرى حول إبرة مغناطيسية فى مركز السلك . وفى اللحظة التى بدأ التيار فيها فى الانسياب ، ظهرت قوة جديدة تؤثر على القطب المغناطيسى وعمودية على جميع الخطوط الواصلة بين السلك والقطب وفى الحالة التى نشأت فيها هذه القوة عن الحركة الدائرية لشحنة كهربائية ، بينت تجربة رولاند أن القوة تتوقف على سرعة الشحنة . هذه الحقائق التى حصل عليها بالتجربة تناقض وجهة النظر الفلسفية التى تقول أن القوة لا بد وأن تؤثر فى الخط الواصل بين الجسمين وأنها تتوقف على البعد بينهما فقط .

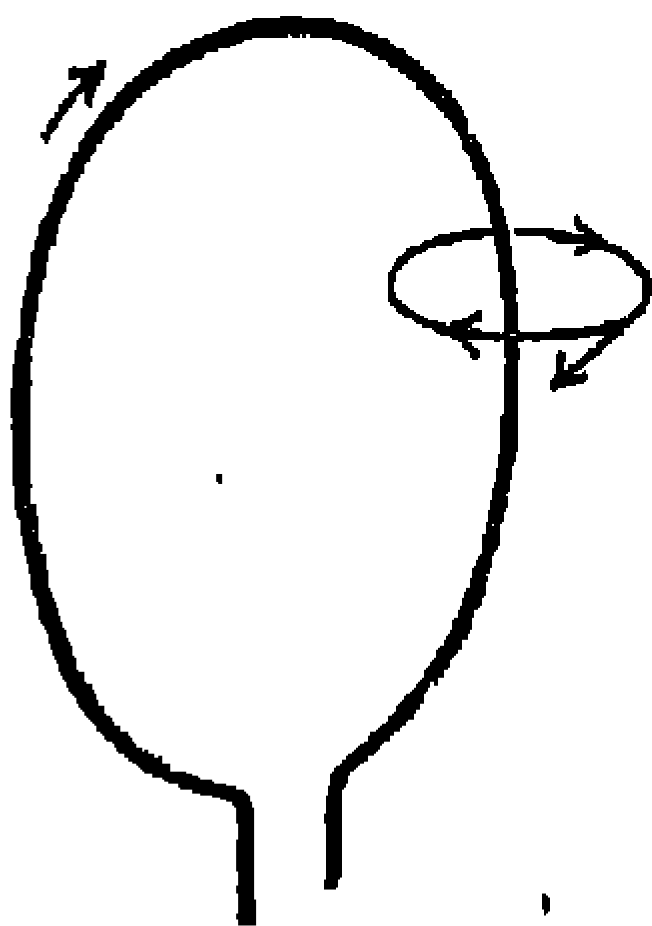
إن التعبير المضبوط الذى يمثل القوة التى يؤثر بها التيار على قطب مغناطيسى معقد للغاية ، والتعبير المناظر فى حالة الجاذبية أبسط منه بكثير . ومع ذلك فيمكننا محاولة النظر إلى الموضوع كما فعلنا فى حالة قوة الجاذبية تماماً . والسؤال الذى أمامنا الآن هو : ماهى القوة التى يؤثر بها التيار على قطب مغناطيسى قريب منه ؟ من الصعب وصف هذه القوة بالـكلام . وحتى الصيغة الرياضية تـكون معقدة للغاية . وأفضل شىء هو تمثيل ما نعلمه عن القوى المؤثرة بالرسم أو بنموذج كلامى يحتوى على خطوط القوى . وتوجد صعوبة سببها أن القطب المغناطيسى لا يوجد إلا مع قطب مغناطيسى آخر فى مزدوج مغناطيسى . ومع ذلك فيمكننا دائماً أن

تتصور أن الإبرة المغناطيسية طويلة بدرجة تجعلنا لا نأخذ فى حسابنا إلا القوى المؤثرة على القطب القريب من التيار . ويكون القطب الثانى بعيداً بدرجة تمكننا من إهمال القوة المؤثرة عليه . ولتحاشى الالتباس سنفرض أن القطب المغناطيسى القريب من السلك هو القطب الموجب . يمكننا قراءة خواص القوة المؤثرة على القطب المغناطيسى الموجب من الرسم التالى .



أولا نلاحظ سهما بجوار السلك يبين اتجاه التيار من الجهد الأعلى إلى الجهد الأدنى . وجميع الخطوط الأخرى هى خطوط قوة تخص هذا التيار واقعه فى مستو معين . وإذا رسمنا هذه الخطوط جيداً ، فإنها تدل على اتجاه متجه القوة الذى يمثل تأثير التيار على قطب موجب معلوم ، كما تعطينا فكرة عن طول هذا المتجه . القوة هى متجه كما نعلم ، ولتعيين هذا المتجه يجب أن نعلم كلا من اتجاهه وطوله . والذى يهمنا أكثر من غيره هو اتجاه القوة المؤثرة على قطب . والسؤال الذى أمامنا هو كيف نعلم من الرسم اتجاه القوة المؤثرة على قطب عند أى نقطة فى الفراغ .

والقاعدة التى نعين بها اتجاه القوة من مثل هذا النموذج ليست ببساطة مناظرتها فى المثال السابق الذى كانت خطوط القوة فيه مستقيمة . الرسم التالى يبين خط قوة واحد وذلك لإيضاح القاعدة . يقع متجه القوة على المماس لخط القوة كما هو موضح .



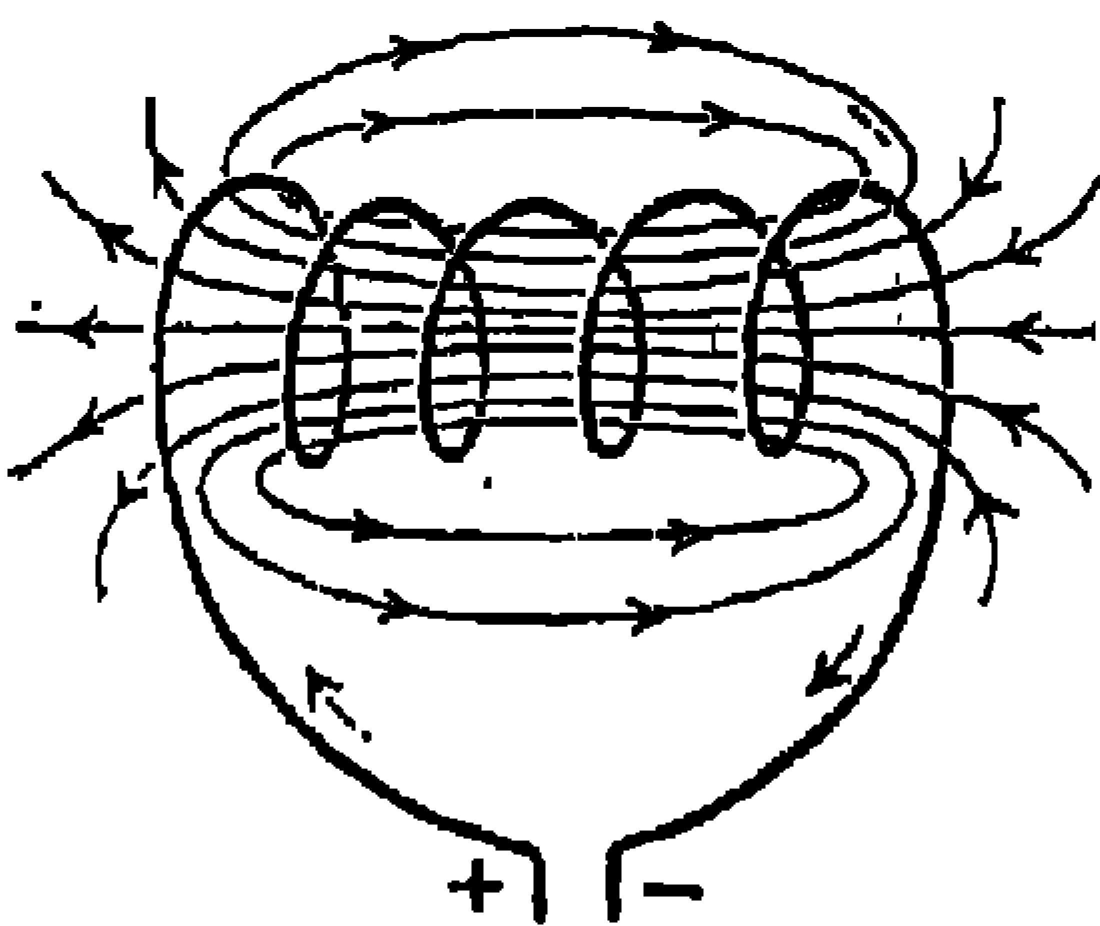
وسهم متجه القوة والأسهم الموجودة على خط القوة تشير جميعاً إلى نفس الاتجاه . أى أن هذا هو الاتجاه الذى تؤثر فيه القوة على القطب المغناطيسى عند هذه النقطة .

والرسم الجيد ، أو الانموذج المضبوط (وهذا تعبير أدق) يعطينا أيضا فكرة عن طول متجه

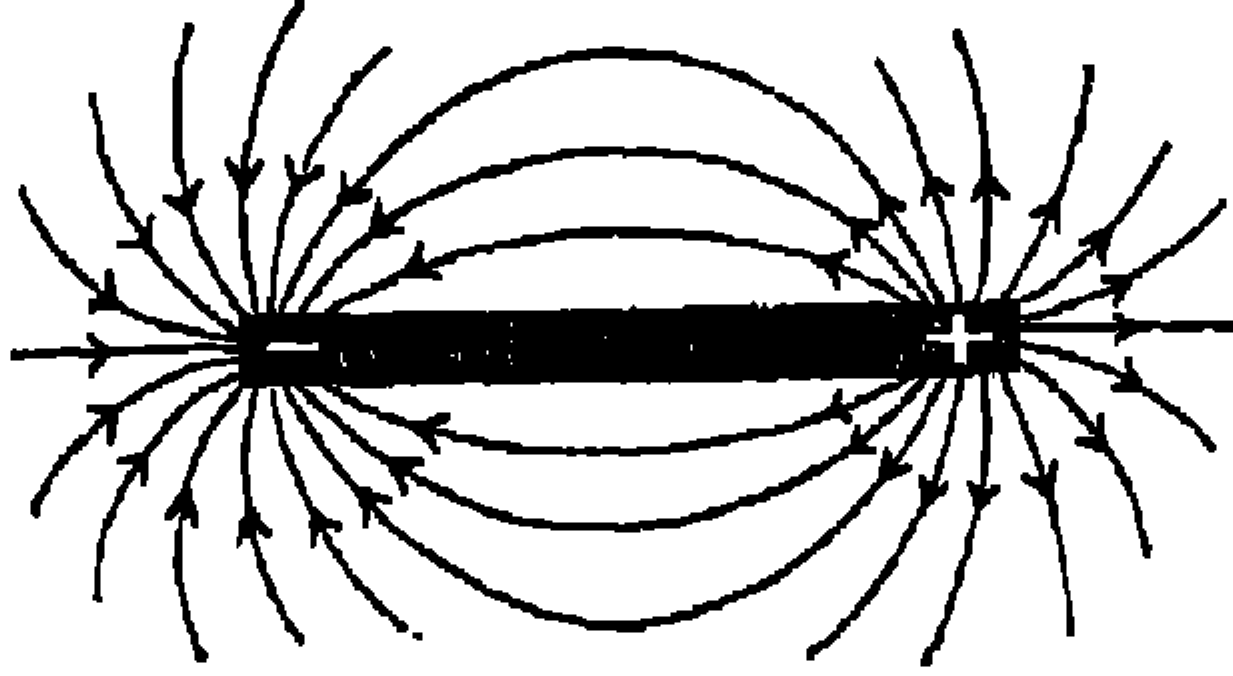
القوة عند أى لحظة . يجب أن يكون هذا المتجه أطول عند ما تكون خطوط القوة أكثف ، أى بالقرب من السلك ، وأقصر عندما تكون الخطوط أقل تكاثفا أى بعيداً عن السلك .

بهذه الطريقة ، تمكننا خطوط القوة أو المجال بعبارة أخرى ، من تعيين القوى المؤثرة على قطب مغناطيسى عند أى نقطة فى الفراغ . وفى الوقت الحالى يكون هذا هو المبرر الوحيد لهذا التصميم المتعب للمجال . وحيث أننا نعلم ماذا يمثل المجال ، فإننا سندرس خطوط القوة المناظرة للتيار دراسة أعمق . هذه الخطوط هى دوائر تحيط بالسلك وتقع فى المستوى العمودى على منستواه . وبقراءة خواص القوة من الرسم ترى مرة ثانية أن القوة تؤثر فى اتجاه عمودى على أى مستقيم واصل بين السلك والقطب . وذلك لأن المماس لدائرة يكون دائما عمودى على نصف القطر . يمكن تلخيص كل ما نعلمه عن القوة المؤثرة فى نموذج المجال . ونحن نضيف فكرة المجال إلى فكرة التيار والقطب المغناطيسى ونستعين بها جميعاً لتمثيل القوة المؤثرة بطريقة بسيطة .

يوجد مجال مغناطيسى يناظر كل تيار ، أى تؤثر قوة على قطب مغناطيسى عند اقترابه من سلك ينساب فيه تيار . ونشير هنا إلى أن هذه الخاصية تمكننا من تصميم أجهزة حساسة تدل على وجود التيار أو عدم وجوده . بمجرد أن نعرف كيف نقرأ خواص القوى المغناطيسية من نموذج المجال لتيار ما ، سنرسم دائما المجال المحيط بالسلك الذى ينساب فيه التيار وذلك لتمثيل تأثير القوى المغناطيسية عند أى نقطة فى الفراغ . ومثالنا الأول هى ما يسمى «الملف الحلزونى» ، وهو ملف من السلك كما هو مبين فى الشكل ، وغرضنا هو أن نعلم بالتجربة كل ما يمكننا عن المجال المغناطيسى الخاص بتيار ينساب فى ملف حلزونى وأن نجمع هذه المعلومات لعمل المجال . والرسم التالى يمثل النتيجة . خطوط القوى المنحنية مقفلة وتحيط بالملف الحلزونى بالطريقة التى تميز المجال المغناطيسى للتيارات ..



ويمكن عمل مجال قضيب مغناطيسى بنفس طريقة عمل مجال كهربائى . والشكل التالى يبين ذلك . تتجه خطوط القوى من القطب الموجب إلى السالب



دائما . ويقع متجه القوة على المماس لخط القوة دائما ويكون أطول ما يمكن بالقرب من القطبين وذلك لأن تكاثف خطوط القوة يكون أكبر ما يمكن عند هاتين النقطتين . يمثل متجة القوة تأثير المغناطيس على قطب مغناطيسى موجب . فى هذه الحالة ، ينشأ المجال عن المغناطيس لا عن التيار .

يجب أن نقارن الشكلين الأخيرين بدقة . فى الشكل الأول يوجد المجال المغناطيسى لتيار ينساب فى ملف حلزونى ، وفى الثانى لمجال قضيب مغناطيسى . فلنهمل كلا من الملف الحلزونى والقضيب ولنلاحظ المجالين الخارجين فقط . نلاحظ على الفور أن كلا من المجالين له نفس الخواص تماما . فى كل من الحالتين تتجه خطوط القوة من أحد طرفى الملف أو القضيب إلى الطرف الآخر .

هذه هى أولى ثمار تمثيل المجال ! فإنه ليصعب جداً ملاحظة تشابه قوى بين تيار ينساب فى ملف حلزونى وبين قضيب مغناطيسى إذا لم نقم بعمل المجال .

يمكننا الآن اختبار فكرة المجال اختباراً أقسى من ذلك بكثير . سنرى فى القريب العاجل ما إذا كانت هذه الفكرة تمثيلا جديداً للقوى المؤثرة أم أنها تعنى شيئا آخر فضلا عن ذلك . يمكننا أن نستعمل المنطق الآتى : افرض مؤقتاً أن المجال يميز جميع الأحداث التى تحددها مصادره بطريقة وحيدة . وليس هذا إلا تخمينا ، وهو يعنى أنه إذا كان لكل من الملف الحلزونى والقضيب نفس المجال ، فإن جميع تأثيراتهما تكون واحدة ، أيضا . ويكون معنى ذلك أن خواص ملفين حلزونيين يحملان تيارين كهربائيين هى نفس خواص قضيب مغناطيسين وأنهما يتجاذبان أو يتنافران على حسب وضعهما النسبى كما فى حالة القضيبين . وهذا يعنى أيضاً أن قضيباً مغناطيسياً وملفاً حلزونياً يتجاذبان أو يتنافران بنفس الطريقة التى ينجذب أو يتنافر بها

قضيبان مغناطيسيان . وبالاختصار يكون معنى ماسبق أن جميع تأثيرات ملف حلزونى يمر فيه تيار هى نفس تأثيرات مغناطيس مناظر وذلك لأن المجال وحده هو المسئول عن هذه التأثيرات والمجال فى كل من الحالتين له نفس الخواص . والتجربة تحقق تخميناتنا تماما !

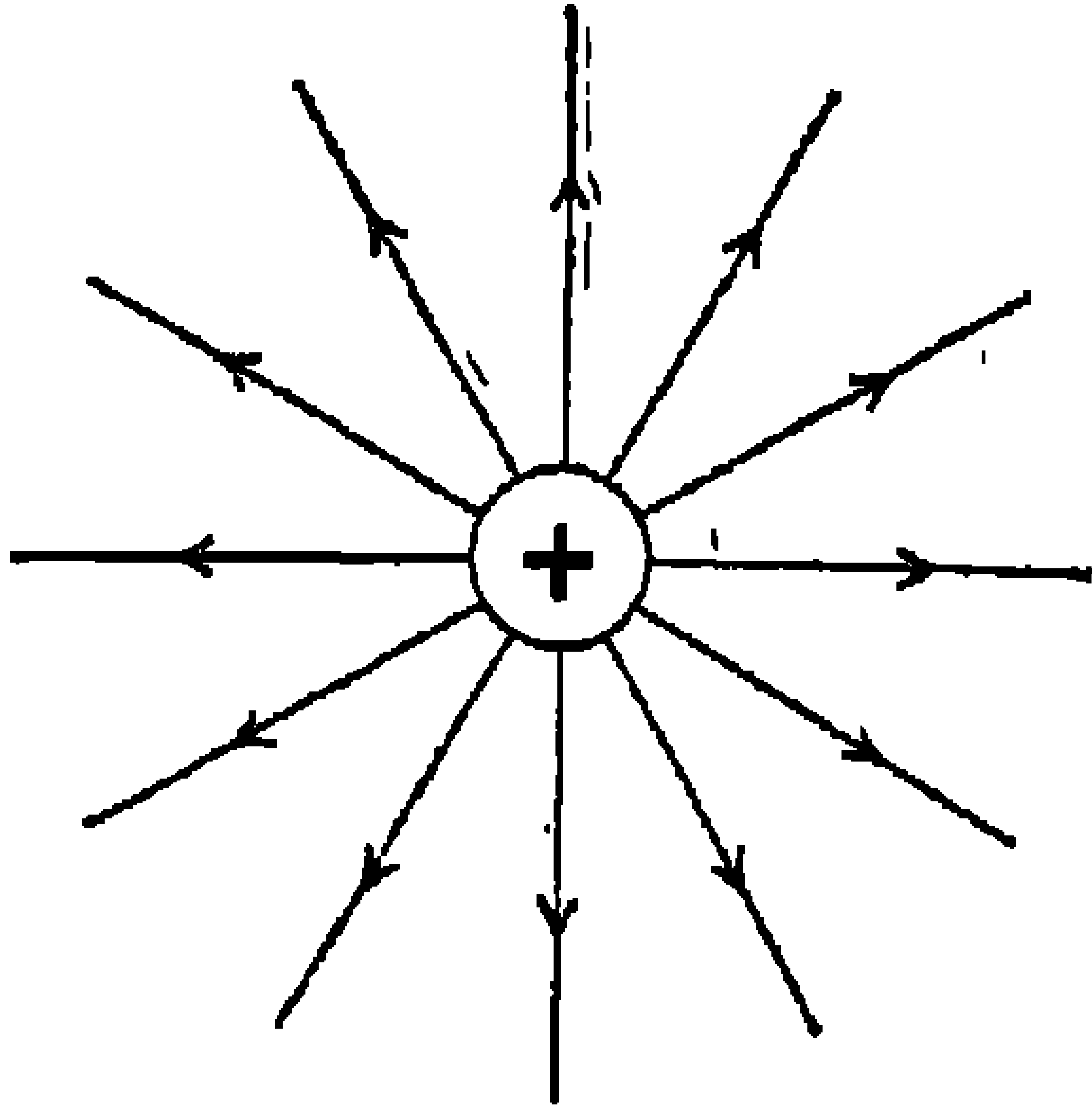
يستطيع القارىء أن يتخيل صعوبة الحصول على هذه الحقائق بدون فكرة المجال ! أن تعبير القوة المؤثرة بين سلك ينساب فيه تيار وبين قطب مغناطيسى معقد للغاية . وفى حالة ملفين حلزونيين يجب علينا دراسة القوى التى يؤثر بها تياران كل على الآخر . ولكن إذا قمنا بذلك مع الاستعانة بالمجال فإننا نلاحظ فوراً خواص هذه التأثيرات بمجرد أن نتحقق من تشابه مجال اللف الحلزونى ومجال القضيب المغناطيسى .

من حقنا الآن أن نعتبر المجال شيئاً آخر يزيد عن فكرتنا الأولى عنه . ويبدو لنا أن خواص المجال وحده هى التى تهم فى وصف الظواهر ، أما اختلاف مصدر المجال فلا يهم . وتظهر أهمية فكرة المجال عندما تؤدى إلى حقائق عملية جديدة .

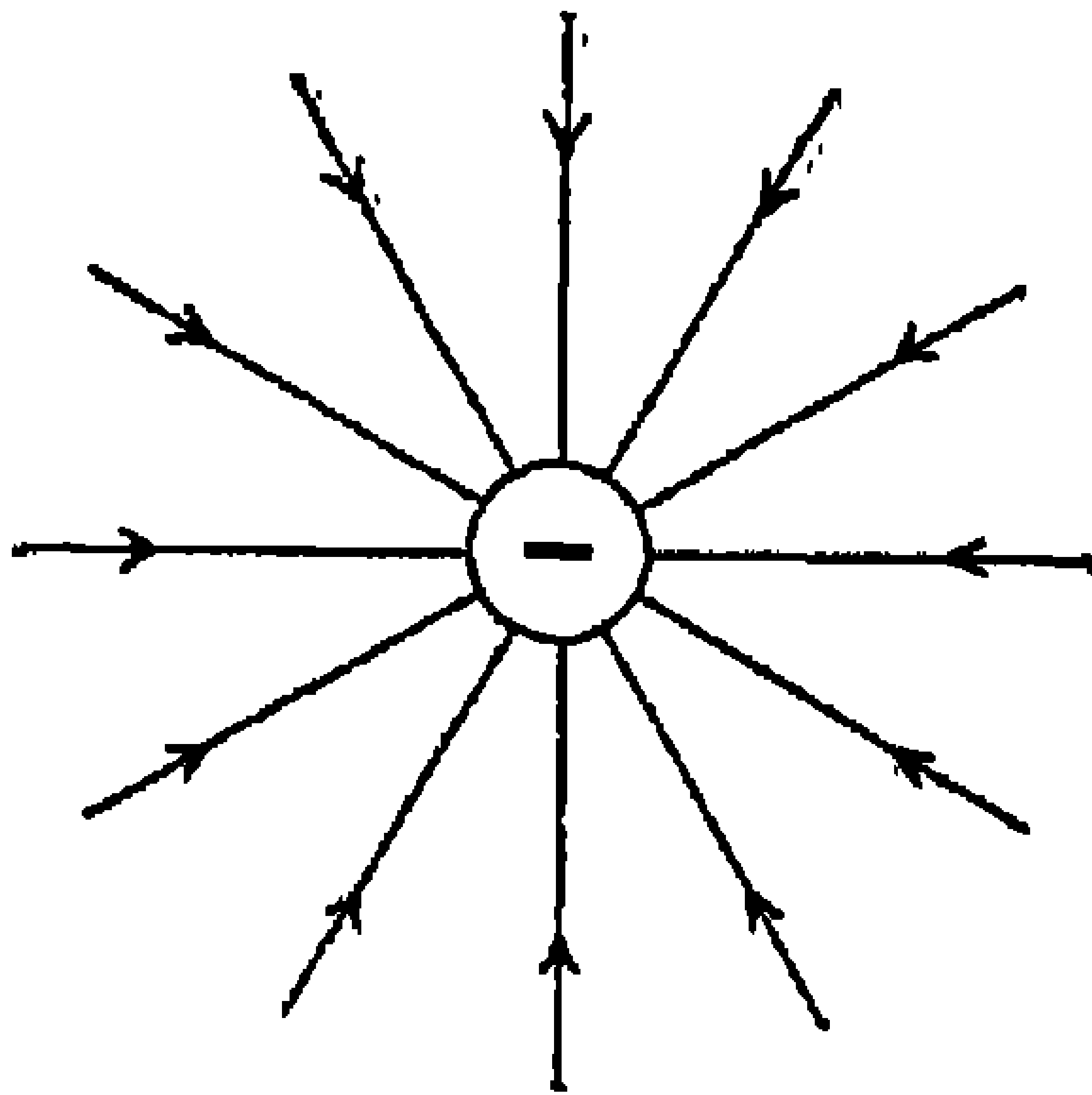
لقد أثبتت فكرة المجال فائدتها الكبيرة . وقد بدأت هذه الفكرة كشىء يوجد بين المصدر والإبرة المغناطيسيه لوصف القوة المؤثرة وكان ينظر للمجال على أنه وكيل للتيار تحدث جميع تأثيرات التيار عن طريقه . ولكن يقوم الآن هذا الوكيل بدور المترجم الذى يترجم القوانين إلى لغة بسيطة واضحة يسهل فهمها .

إن النجاح الأول للتمثيل بالمجال يجعلنا نظن أن من المناسب دراسة جميع تأثيرات التيارات والمغناطيسات والشحنات بطريقة غير مباشرة ، أى بمساعدة المجال كمفسر .

ويمكن اعتبار المجال كشىء يصاحب التيار دائما ، فالمجال يوجد رغم عدم وجود قطب مغناطيسى نختبر به وجوده (أى المجال) . فلنحاول تتبع هذا الدليل الجديد باستمرار .



ويمكن دراسة مجال موصل مشحون بنفس الطريقة التى درسنا بهـا مجال الجاذبية أو مجال التيار أو المغناطيس ومرة أخرى نجد أبسط الأمثلة ! لعمل مجال كرة مشحونة يجب أن نعلم أى نوع من القوى يؤثر على جسم اختبار صغير موجب الشحنة عند اقترابه من مصدر المجال أى من الكرة المشحونة . واختيار جسم اختبار موجب الشحنة لا سالبها هو مسألة اتفاق فقط لتحديد اتجاه الأسهم الموجودة على خطوط القوة . والنموذج فى هذه الحالة يشابه مجال الجاذبية (ص ٩٠) وذلك لتشابه قانونى كولوم ونيوتن ، والفرق الوحيد بين هذين النموذجين هو أن الأسهم تشير فى اتجاهين متضادين . وفى الواقع نعلم أن شحنتين موجبتين تتنافران وأن كتلتين تتجاذبان . ومع ذلك فإن مجال كرة سالبة الشحنة يكون مطابقا لمجال الجاذبية وذلك لأن جسم الاختبار الصغير الموجب الشحنة سيجذب إلى مصدر المجال .



إذا كان لدينا قطبان ساكنان أحدهما كهربائى والآخر مغناطيسى فإنه لاتوجد قوة جذب أو طرد بينهما ويمكن التعبير عن هذه الحقيقة بلغة المجال كما يأتى : المجال الكهربائى الأستاتيكى لا يؤثر على المجال المغناطيسى وبالعكس . والمجال الكهربائى الاستاتيكى هو المجال الكهربائى الذى لايتغير بمرور الزمن . تبقى المغناطيسات والشحنات ساكنة بجانب بعضها أية فترة زمنية إذا لم تؤثر عليها قوة خارجية .

كل من المجال الكهربائى والمغناطيسى ومجال الجاذبية يختلف تماما عن الآخرين ولا تمتزج هذه المجالات ويحتفظ كل منها بذاته ولا يتأثر بالآخرين .

لنعود الآن إلى الكرة الكهربائية التى بقيت حتى الآن ساكنة . نفرض أن هذه الكرة بدأت تتحرك نتيجة لتأثير قوة خارجية . تتحرك الكرة المشحونة . بلغة المجال تقرأ الجملة السابقة كما يأتى : يتغير مجال الكرة المشحونة بتغير الزمن . ولكننا نعلم من تجربة رولاند أن حركة هذه الكرة المشحونة تكافىء تياراً كهربائيا . وأيضاً نعلم أن مجالا مغناطيسياً يصاحب كل تيار . وعلى ذلك تكون لدينا السلسلة الآتية :

حركة شحنة ← تغير فى مجال كهربائى .



تيار ← المجال المغناطيسى المصاحب .

وعلى ذلك نستنتج أن : التغير فى المجال الكهربائى الناتج عن حركة الشحنة يصطحب دائماً بمجال مغناطيسى .

تعتمد هذه النتيجة على تجربة أورستد ولكنها تشمل أكثر من ذلك . فهذه النتيجة تحوى الاعتراف بأن مصاحبة مجال مغناطيسى لمجال كهربائى يتغير مع الزمن حقيقة أساسية لدراستنا القادمة .

إذا ماظلت شحنة ما ساكنة فإنه لايوجد سوى مجال الكتروستاتيكى ولكن يظهر مجال مغناطيسى بمجرد أن تبدأ الشحنة فى الحركة . ويمكننا أن نذهب إلى أبعد من ذلك . يكون المجال المغناطيسى الذى تولده حركة الشحنة أشد إذا كانت الشحنة أكبر وإذا تحركت أسرع . هذه الحقيقة هى أيضاً نتيجة لتجربة رولاند . مرة أخرى باستعمال لغة المجال يمكننا أن نقول : كلما كان تغير المجال الكهربائى أسرع كلما كان المجال المغناطيسى المصاحب أشد .

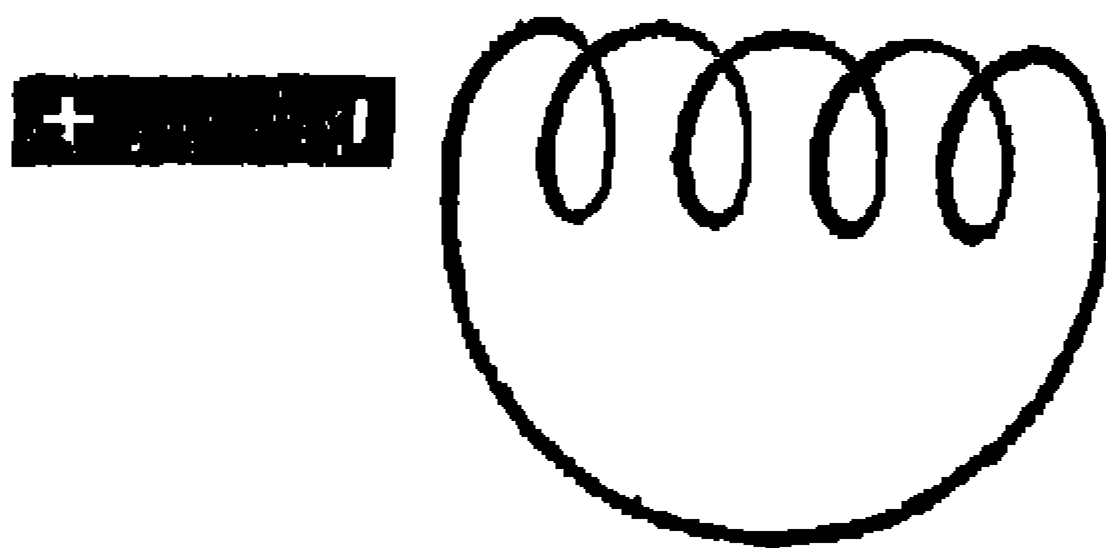
لقد حاولنا هنا ترجمة بعض الحقائق المعروفة من لغة الموائع التى نشأت من وجهة النظر الميكانيكية القديمة إلى لغة المجالات الجديدة . وسنرى فيما بعد وضوح وبعد مدى لغتنا الجديدة .

دعامتا نظرية المجال :

« يصاحب تغير المجال الكهربائى مجال مغناطيسى » . إذا بادلنا كلمتى كهربائى ومغناطيسى كلا محل الأخرى فإن الجملة السابقة تصبح : « يصاحب تغير المجال المغناطيسى مجال كهربائى » . لا يمكن الجزم بصحة أو خطأ هذه العبارة إلا عملياً بالتجربة ولكن لغة المجال هى التى تعطينا فكرة صياغة هذه المسألة .

منذ أكثر من مائة عام بقليل أجرى فارادى تجربة نتج عنها الاكتشاف العظيم للتيارات المنتجة بالتأثير .

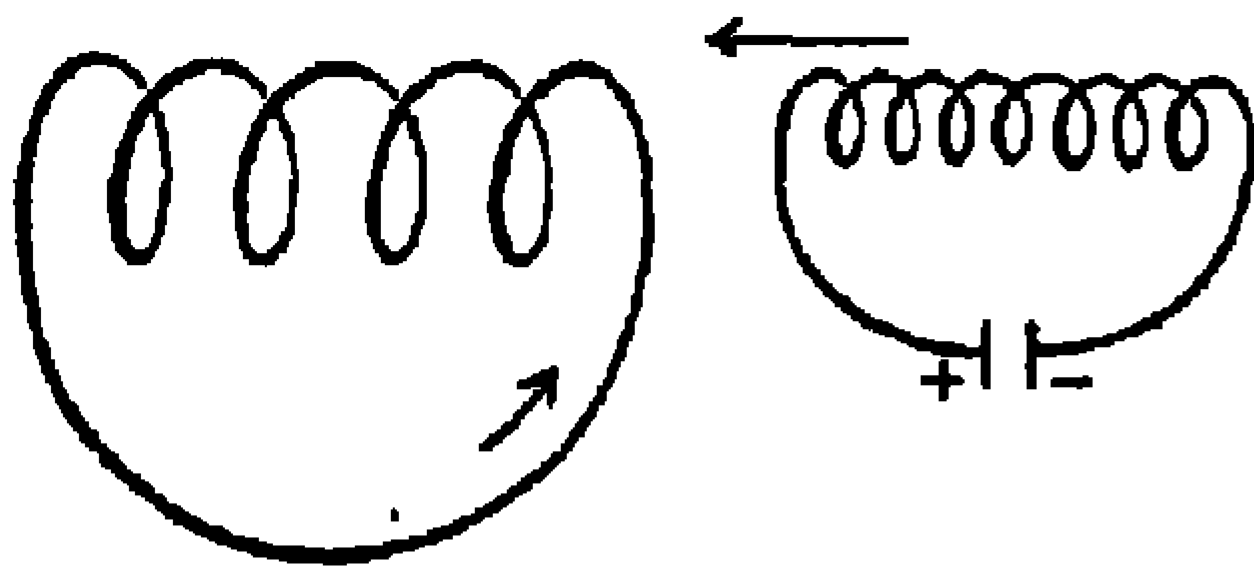
والتجربة بسيطة للغاية . نحتاج فقط إلى ملف حلزونى أو أية دائرة كهربائية أخرى ، وقضيب مغناطيس وأحد الأجهزة التى تدلنا على وجود التيار . عند الابتداء يكون القضيب المغناطيسى ساكناً بالقرب من الملف الحلزونى الذى يكون دائرة مقفلة . لا يمر أى تيار فى السلك وذلك لعدم وجود مصدر له . يوجد مجال للمغناطيس الساكن وهو مجال لا يتغير بمرور الزمن . وفجأة يغير وضع المغناطيس إما بإبعاده كلية أو بتقريبه من الملف الحلزونى ، وذلك حسب رغبتنا . فى هذه اللحظة يظهر تيار لفترة زمنية قصيرة جداً ، ثم يتلاشى بعد ذلك . ويظهر التيار كلما تغير موضع المغناطيس ، ويمكن التحقق من وجود التيار بواسطة جهاز حساس . ولكن التيار حسب نظرية المجال يعنى وجود مجال كهربائى يعمل على انسياب المائعين الكهربائيين خلال السلك . وعلى ذلك يتلاشى كل من التيار والمجال الكهربائى عندما يسكن المغناطيس ثانية .



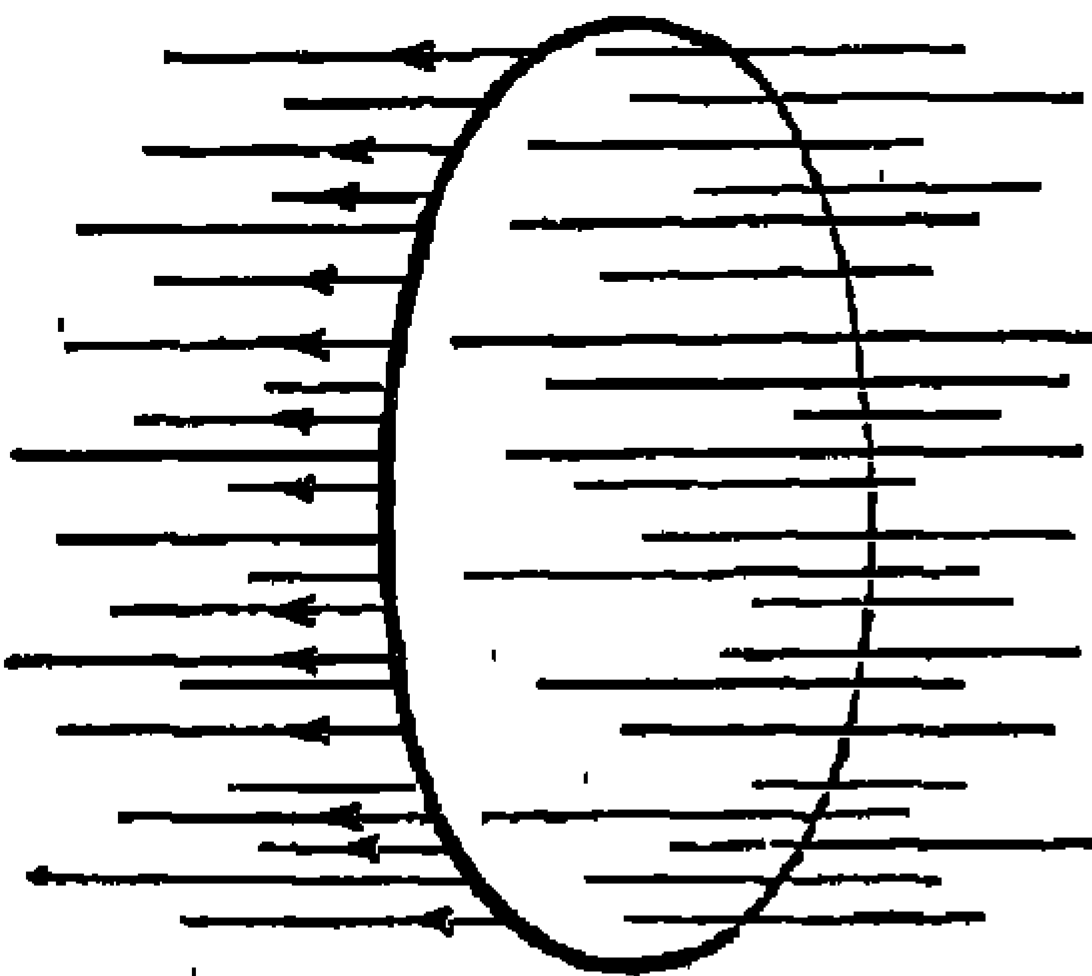
تخيل مؤقتاً أن لغة المجال غير معروفة وأنه يجب وصف نتائج هذه التجربة كمياً ونوعياً بلغة الميكانيكا القديمة : على ذلك تبين هذه التجربة أنه نتيجة لحركة المزدوج المغناطيسى ولدت قوة جديدة تحرك المائع الكهربائى فى السلك . ويكون

السؤال الثانى كما يأتى : ما الذى تتوقف عليه هذه القوة ؟ وتكون الإجابة على هذا السؤال فى غاية الصعوبة . فيكون من المحتم علينا أن ندرس علاقة القوة بسرعة المغناطيس وشكله وبشكل الدائرة . وزيادة على ذلك ، فإننا إذا عبرنا عن هذه التجربة باللغة القديمة فإنها لا تعطينا أية أشارة على الإطلاق للدلالة على ما إذا كان من الممكن إنتاج تيار بالتأثير بتحريك دائرة كهربائية أخرى تحمل تياراً بدلاً من تحريك قضيب مغناطيسى .

تختلف الحالة تماماً إذا استعملنا لغة المجال وفرضنا مرة أخرى أن المجال هو الذى يحدد جميع التأثيرات . نرى على الفور أن الملف الحلزونى الذى يمر فيه تيار يقوم مقام قضيب المغناطيس تماماً . يبين الشكل ملفين اسطوانيين الأول صغير يمر فيه تيار ، والثانى وهو الأكبر نختبر به وجود التيار المنتج بالتأثير . يمكننا أن نحرك الملف الحلزونى كما حركنا قضيب المغناطيس من قبل . كما يمكننا بدلاً من تحريك الملف الصغير أن نولد مجالا مغناطيسياً ونلاشيه بتوليد التيار وملاشاته ، أى بفتح وقفل الدائرة . مرة أخرى نثبت عملياً صحة حقائق جديدة نتجت عن نظرية المجال .



فلنعتبر مثالاً أبسط من ذلك . لدينا سلك مقفل ولا يوجد أى مصدر للتيار . بالقرب من هذا السلك يوجد مجال مغناطيسى . وليس من المهم معرفة مصدر هذا المجال الذى قد يكون دائرة أخرى يمر فيها تيار أو قضيب مغناطيسى . يبين الشكل الدائرة المقفلة وخطوط القوة المغناطيسية . إن الوصف الكمى والنوعى لظاهرة إنتاج التيارات بالتأثير بسيط جداً إذا استخدمنا لغة المجال . وكما هو مبين فى الشكل تمر بعض خطوط القوة خلال السطح المحدود بالسلك .



ويجب علينا دراسة خطوط القوى التي تقطع ذلك الجزء من المستوى الذي يحيط به السلك . لا يوجد أي تيار كهربائي مادام المجال لا يتغير مهما كانت شدته . ولكن يبدأ تيار في المرور في السلك بمجرد أن يتغير عدد خطوط القوة التي تخترق السطح المحاط بالسلك . ويتعين التيار تماماً بالتغير في عدد خطوط القوة التي تخترق السطح مهما كان السبب في حدوث هذا التغير . والتغير في عدد خطوط القوة هو الشيء الوحيد الضروري لوصف التيار المنتج بالتأثير كمياً أو نوعياً . «عدد خطوط القوى يتغير» يعني أن تكاثف الخطوط يتغير ، وهذا كما يذكر القارىء يعني أن شدة المجال تتغير .

وهذه هي الحلقات الهامة في سلسلتنا المنطقية : تغير في مجال مغناطيسي ← تيار منتج بالتأثير ← حركة شحنة ← وجود مجال كهربائي . وعلى ذلك : يصطحب المجال المغناطيسي المتغير بمجال كهربائي .

بذلك وجدنا أهم دعامتين لنظرية المجال الكهربائي والمغناطيسي . الدعامة الأولى هي العلاقة بين المجال الكهربائي المتغير والمجال المغناطيسي . وقد ظهرت هذه العلاقة من تجربة أورستد على انحراف الإبرة المغناطيسية وأدت إلى النتيجة الآتية : يصطحب المجال الكهربائي المتغير بمجال مغناطيسي . أما الدعامة الثانية فهي تربط بين المجال المغناطيسي المتغير وبين التيارات المنتجة بالتأثير وقد ظهر هذا الارتباط من تجربة فارادي . وقد كانت كل من هاتين العلاقتين أساساً للوصف الكمي .

مرة أخرى يظهر المجال الكهربائي الذي يصاحب المجال المغناطيسي المتغير كأنه شيء حقيقي . وضحنا فيما سبق أن المجال المغناطيسي يكون موجوداً رغم عدم وجود قطب الاختبار . بالمثل يجب أن نقول هنا أن المجال الكهربائي يوجد رغم عدم وجود السلك الذي يدل على وجود التيار المنتج بالتأثير .

وفي الواقع يمكن اختصار هاتين الدعامتين إلى دعامة واحدة ألا وهي نتيجة تجربة أورستد فمن الممكن استنتاج نتيجة تجربة فارادي من تجربة أورستد وقانون بقاء الطاقة . ولقد استخدمنا الدعامتين لغرض التوضيح والاقتصاد فقط .

يجب ذكر نتيجة أخيرة للوصف بالمجال . نفرض أن لدينا دائرة يمر فيها تيار ونفرض أن مصدر التيار هو بطارية فولتا مثلا . نفرض أن الاتصال بين السلك وبين مصدر التيار قد قطع فجأة . طبعاً لا يوجد تيار الآن ! . ولكن أثناء فترة قطع الاتصال الصغيرة تحدث عملية متداخلة معقدة ، وهى عملية من الممكن التنبأ بها من نظرية المجال . قبل قطع التيار كان يوجد مجال مغناطيسى . يتغير عدد خطوط القوة التى تخترق السطح المحدد بالسلك سريعاً جداً . ولكن هذا التغير السريع مهما كان السبب فى حدوثه ، لابد وأن يولد تياراً بالتأثير . والذى يهم فى الواقع هو التغير فى المجال المغناطيسى . والتيار المنتج بالتأثير يكون أشد كلما ازداد هذا التغير . هذه النتيجة هى اختبار جديد للنظرية . يجب أن يصاحب قطع التيار ظهور تيارشديد ولحظى منتج بالتأثير . ومرة أخرى يتحقق ذلك عملياً . وكل شخص قطع دائرة كهربائية لابد وأن يكون قد لاحظ ظهور شرارة . تدل هذه الشرارة على الفرق الكبير فى الجهد الذى يسببه التغير فى المجال المغناطيسى .

ويمكننا النظر إلى هذه العملية من وجهة نظر أخرى هى وجهة نظر الطاقة . اختفى مجال مغناطيسى وتولدت شرارة . الشرارة تمثل طاقة وإذن فلا بد أن يمثل المجال المغناطيسى طاقة . وإذا كنا سنستعمل فكرة المجال ولغته باستمرار فلا بد وأن نعتبر المغناطيس كمستودع للطاقة . فبهذه الطريقة وحدها نتمكن من وصف الظواهر الكهربائية والمغناطيسية دون أن نناقض قانون بقاء الطاقة .

إن المجال الذى بدأ كنموذج معين أخذ يزداد واقعية . لقد ساعدنا على فهم حقائق قديمة وقادنا إلى حقائق جديدة . وإن ربط الطاقة بالمجال لهو خطوة إلى الأمام فى الطور الذى أخذنا فيه نهتم بفكرة المجال وتحطم فكرة السيال أو المائع الضرورية لوجهة النظر الميكانيكية .

واقعية المجال :

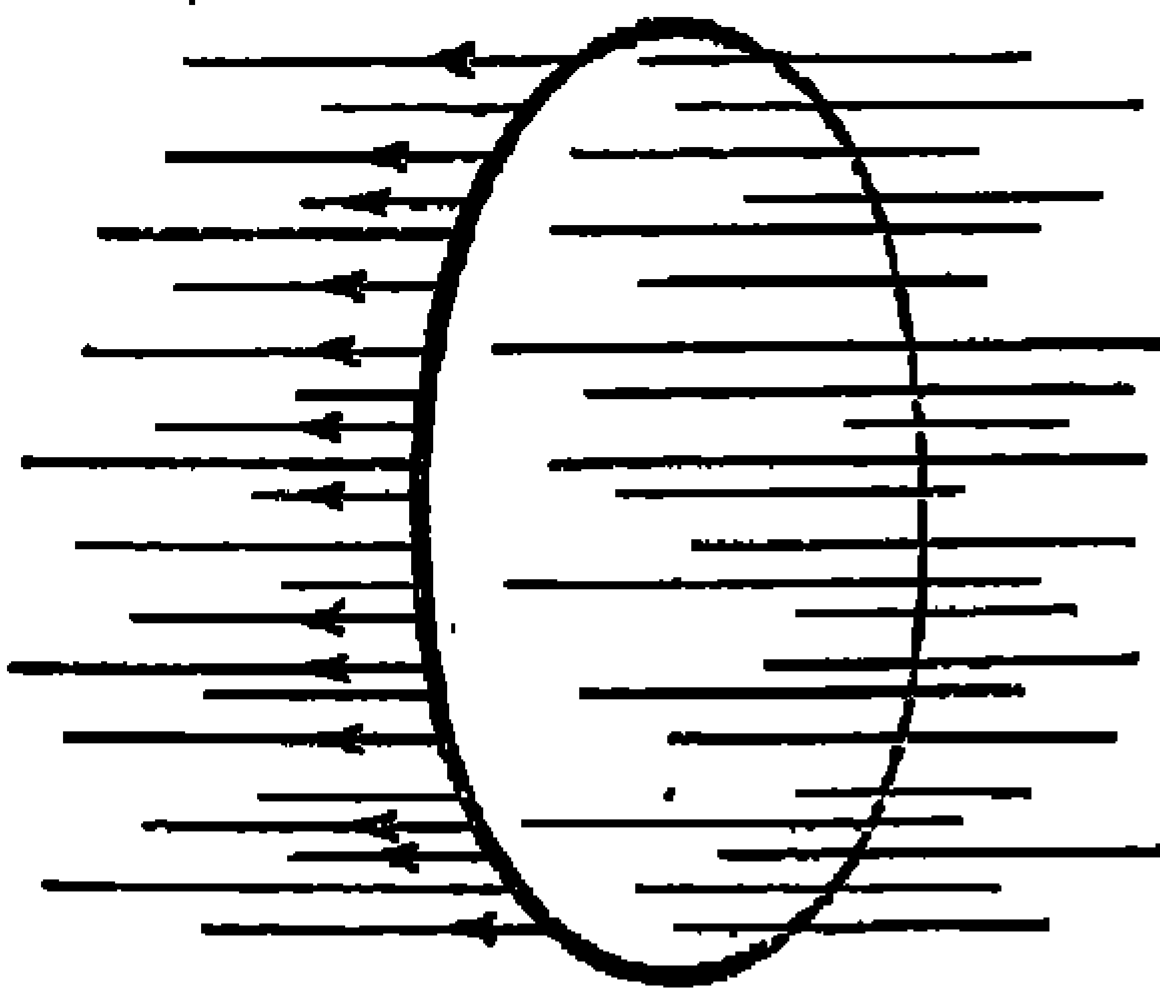
يمكن تلخيص الوصف الكمى والرياضى لقوانين المجال فى المعادلات المسماة بمعادلات ماكسويل . ولقد أدت الحقائق التى ذكرناها فيما سبق إلى صياغة هذه

المعادلات ومع ذلك فهى تدل على أكثر مما أمكننا الأشارة إليه . وبساطة هذه المعادلات تخفى عمقها الذى لا يظهر إلا بالدراسة الدقيقة . وتعد صياغة هذه المعادلات أهم حدث فى علم الطبيعة منذ عهد نيوتن . والسبب فى ذلك هو أنه فضلاً عن اتساع مجالها فهى تكون نموذجاً لنوع جديد من القوانين .

ويمكن تلخيص معادلات ماكسويل (التى تظهر فى جميع معادلات علم الطبيعة الحديث الأخرى) فى جملة واحدة . معادلات ماكسويل هى قوانين تمثل تركيب المجال .

لماذا تختلف معادلات ماكسويل فى الشكل والصفات عن معادلات الميكانيكا الكلاسيكية ؟ وماذا نعنى بقولنا أن هذه المعادلات تصف تركيب المجال ؟ وكيف يمكننا باستعمال نتائج تجربتى أورستد وفارادى تكوين نوع جديد من القوانين تثبت أهميته البالغة فى التطورات التالية لعلم الطبيعة ؟

لقد رأينا من تجربة أورستد كيف ينتج مجال مغناطيسى حول مجال كهربائى متغير . ورأينا من تجربة فارادى كيف ينتج مجال كهربائى حول مجال مغناطيسى متغير . سنوجه اهتمامنا مؤقتاً إلى إحدى هاتين التجربتين ، إلى تجربة فارادى مثلا ، لنحصل على بعض الخواص المميزة لنظرية ماكسويل . سنعتبر مرة أخرى الشكل الذى يمثل نشأة تيار منتج بالتأثير من مجال مغناطيسى متغير . نعلم أن التيار ينتج بالتأثير إذا تغير عدد خطوط القوة التى تخترق السطح المحدد بالسلك . على ذلك يظهر التيار المنتج بالتأثير إذا تغير المجال أو إذا تغير شكل الدائرة أو إذا تحركت الدائرة . وإذا راعينا جميع



هذه الاحتمالات ودرسنا التأثيرات التى تنتج عن كل منها فمن المؤكد أن ذلك يؤدى إلى نظرية معقدة جداً . ولكن ألا يمكننا تبسيط هذه المسألة ؟ دعنا نحذف من دراستنا كل ما يتعلق بشكل الدائرة وطولها والسطح المحدد بالسلك

لنتخيل أيضاً أن الدائرة فى الشكل السابق تصغر تدريجياً إلى أن تصبح دائرة كهربائية صغيرة جداً حول نقطة معينة فى الفراغ . فى هذه الحالة لا يكون لشكل الدائرة أو حجمها أى تأثير على دراستنا . فى هذه العملية النهائية التى يؤول فيها المنحنى المقفل إلى نقطة يختفى كل من الشكل والحجم أوتوماتيكياً من دراستنا ونحصل على قوانين تربط بين التغير فى المجال المغناطيسى والكهربائى عند نقطة اختيارية فى الفراغ وعند لحظة اختيارية .

وعلى ذلك تكون هذه هى إحدى الخطوات الأساسية المؤدية إلى معادلات ماكسويل . ومرة أخرى هذه هى تجربة مثالية تجرى فى الخيال بتكرار تجربة فارادى على دائرة صغيرة تؤول فى النهاية إلى نقطة .

يجب علينا أن نسمى ماسبق نصف خطوة بدلا من خطوة كاملة . فحتى الآن كان اهتمامنا موجها إلى تجربة فارادى . ولكن يجب دراسة دعامة المجال الثانية المبنية على تجربة أورستد بطريقة مشابهة وبنفس الدرجة من الدقة . فى هذه التجربة تلتف خطوط القوة المغناطيسية حول التيار . إذا جعلنا الخطوط الدائرية للقوة المغناطيسية تصغر وتؤول إلى نقطة نحصل على النصف الثانى للخطوة . وتعطينا الخطوة كلها علاقة بين التغير فى كل من المجالين الكهربائى والمغناطيسى عند نقطة اختيارية فى الفراغ ، وعند لحظة اختيارية .

ولكن تلزم خطوة أخرى أساسية . حسب تجربة فارادى يجب أن يوجد سلك يدل على وجود المجال الكهربائى كما يجب أن يوجد قطب مغناطيسى أو إبرة مغناطيسية لاختبار وجود مجال مغناطيسى فى تجربة أورستد . ولكن نظرية ماكسويل الجديدة تذهب إلى أبعد من هذه الحقائق العملية . فحسب نظرية ماكسويل المجال الكهربائى والمغناطيسى أو بالاختصار المجال الكهرمغناطيسى هو شىء حقيقى واقعى . فالمجال المغناطيسى المتغير يولد مجالا كهربائياً بصرف النظر عن وجود أو عدم وجود سلك يدل على وجود هذا المجال ، والمجال الكهربائى المتغير يولد مجالا مغناطيسياً بصرف النظر عن وجود أو عدم وجود قطب مغناطيسى للدلالة على وجوده .

أي أن هناك خطوتين قد أدتا إلى معادلات ماكسويل . الخطوة الأولى : عند دراسة تجربتي أورستد وروولاند كان من الضروري أن يصغر كل من خط المجال المغناطيسي الدائري الملتف حول التيار والمجال الكهربائي المتغير ويؤول إلى نقطة ، وعند دراسة تجربة فارادي كان من الضروري أن يصغر خط المجال الكهربائي الدائري الملتف حول المجال المغناطيسي المتغير ويؤول إلى نقطة . والخطوة الثانية هي النظر إلى المجال على أنه شيء حقيقي واقعي ، فالمجال الكهرمغناطيسي بمجرد توليده يؤثر ويتغير حسب قوانين ماكسويل .

ومعادلات ماكسويل تصف تركيب المجال الكهرمغناطيسي . وتطبق هذه المعادلات عند أي نقطة في الفراغ على عكس القوانين الميكانيكية التي لاتطبق إلا حيث توجد مادة أو شحنات .

ونحن نذكر كيف كانت الحالة في الميكانيكا . إذا علمت القوة المؤثرة على جسيم عند أي لحظة وسرعة وموضع الجسيم عند لحظة واحدة فقط فإن من الممكن التنبأ بمسار الجسيم . وفي نظرية ماكسويل إذا علمنا المجال عند لحظة واحدة فقط يمكننا باستخدام معادلات النظرية استنتاج الكيفية التي يتغير بها المجال عند أية لحظة وعند أي نقطة في الفراغ . تمكننا معادلات ماكسويل من تتبع تاريخ المجال كما تمكننا المعادلات الميكانيكية من تتبع تاريخ الجسيمات المادية .

ولكن لايزال هناك فرق أساسي بين القوانين الميكانيكية وقوانين ماكسويل . إذا قارنا قوانين نيوتن للجاذبية وقوانين ماكسويل للمجال تتضح بعض الخواص المميزة التي تعبر عنها هذه المعادلات .

بمساعدة قوانين نيوتن يمكننا استنتاج حركة الأرض من القوة المؤثرة بين الشمس والأرض وهذه القوانين تربط بين حركة الأرض وبين تأثير الشمس (البعيدة جداً) عليها . فالأرض والشمس رغم كبر البعد بينهما تمثلان معاً في مسرحية القوى .

في نظرية ماكسويل لايوجد ممثلون ماديون . تعبر المعادلات الرياضية لهذه النظرية عن القوانين التي يتبعها المجال الكهرمغناطيسي ، وهي ، على خلاف

قوانين نيوتن ، لا تربط بين حديثين بعيدين جداً . فهى لا تربط بين ما يحدث هنا بالظروف هناك . فالمجال فى مكان ما فى لحظة معينة يتوقف على المجال فى الجوار المباشر عند اللحظة السابقة . إذا علمنا ما يحدث عند نقطة معينة الآن فإن معادلات ماكسويل تمكننا من التنبؤ بما سيحدث فى الجوار المباشر لهذه النقطة بعد زمن قليل . تمكننا هذه المعادلات من زيادة معلوماتنا عن المجال بخطوات قصيرة . ويمكننا استنتاج ماذا يحدث هنا من الذى حدث فى مكان بعيد ، بجمع هذه الخطوات القصيرة جداً . أما فى نظرية نيوتن فلا يسمح إلا بخطوات كبيرة تربط بين أحداث بعيدة . ويمكن الحصول مرة ثانية على نتائج تجربتى فارادى وأورستد من نظرية ماكسويل عن طريق واحد هو جمع خطوات صغيرة كل منها يتبع معادلات ماكسويل .

تبين الدراسة الرياضية الدقيقة لمعادلات ماكسويل أنه يمكن استنتاج نتائج جديدة وغير متوقعة . ويمكن اختبار النظرية اختباراً قاسياً لأن النتائج النظرية لها الآن صفة كمية ويكشف عنها بواسطة سلسلة كاملة من الحجج المنطقية .

لنتخيل مرة أخرى تجربة مثالية . قوة خارجية تؤثر فتجعل كرة مشحونة بالكهرباء تذبذب بسرعة بحيث تكون حركتها مثل حركة البندول . كيف سنستخدم معلوماتنا عن تغيرات المجال فى وصف كل ما يحدث هنا بلغة المجال ؟

تحدث ذبذبة الشحنة مجالا كهربائيا متغيراً ، وهذا يصطحب دائما بمجال مغناطيسى متغير إذا وضع سلك يكون دائرة مقفلة بالقرب من الشحنة فإن المجال المغناطيسى المتغير يصطحب بتيار كهربائى فى الدائرة . ليس كل هذا إلا تكراراً لحقائق معلومة ، ولكن دراسة معادلات ماكسويل تجعلنا نمعن النظر فى مسألة الشحنة الكهربائية المتذبذبة . بتطبيق معادلات ماكسويل رياضياً يمكننا العثور على صفات المجال المحيط بشحنة متذبذبة ، وعلى تركيبه بالقرب من المصدر وبعيدا عنه ، وعلى تغيرات هذا المجال بمرور الزمن . ونتيجة هذا التطبيق هو الموجة الكهرمغناطيسية . الشحنة المتذبذبة التى تتحرك بسرعة معينة فى الفراغ تشع طاقة ولكن تحويل الطاقة ، أى حركة حالة من حالات المادة ، يميز جميع الظواهر الموجية .

لقد درسنا أنواعا مختلفة من الأمواج . كان لدينا الموجبات الطولية التى تنتج عن الكرة النابضة حيث تنتقل تغيرات الكثافة خلال الوسط . وكان لدينا أيضاً الوسط الغروى الذى تنتشر فيه الموجات المستعرضة . ماهو نوع التغيرات التى تنتشر فى حالة الموجة الكهرمغناطيسية ؟ مجرد تغيرات المجال الكهرمغناطيسى ! كل تغير فى مجال كهربائى ينتج مجالا مغناطيسياً ، وكل تغير فى مجال مغناطيسى ينتج مجالا كهربائياً ، كل تغير فى . . . وهكذا . وحيث أن المجال يمثل طاقة فإن جميع هذه التغيرات المنتشرة فى الفراغ بسرعة معينة تنتج موجة . وكما نستنتج من النظرية ، تقع جميع خطوط القوة الكهربائية والمغناطيسية دائما فى مستويات عمودية على اتجاه الانتشار . على ذلك تكون الموجة الناتجة مستعرضة . لا تزال الصفات الأصلية لصورة المجال التى كوناها من تجربتى أورستد وفارادى محتفظاً بها ولكننا نتحقق الآن من أن لها معنى أعمق .

تنتشر الموجة الكهرمغناطيسية فى الفراغ المطلق . ومرة أخرى هذه نتيجة للنظرية . إذا توقفت الشحنة المتذبذبة فجأة عن الحركة فإن المجال يصبح مجالاً الكتروستاتيكيا . ولكن سلسلة الأمواج التى ولدتها حركة الشحنة تستمر فى الانتشار . ويكون للموجات وجود مستقل ويمكن تتبع تاريخها كما نتتبع تاريخ أى شىء مادى آخر .

نفهم الآن لماذا تنشأ الصورة التى كوناها للموجة الكهرمغناطيسية التى تنتشر بسرعة معينة فى الفراغ والتى تتغير مع الزمن من معادلات ماكسويل . السبب الوحيد لذلك هو أن هذه المعادلات تصف تركيب المجال الكهرمغناطيسى عند أى نقطة فى الفراغ وعند أية لحظة .

هناك سؤال آخر فى غاية الأهمية . ماهى السرعة التى تنتشر بها الموجة الكهرمغناطيسية فى الفراغ المطلق ؟ تعطينا النظرية بمساعدة بعض الاحصائيات التى نحصل عليها من تجارب بسيطة لاعلاقة لها بالانتشار الفعلى للامواج ، إجابة واضحة : سرعة الموجة الكهرمغناطيسية تساوى سرعة الضوء .

لقد كونت تجربتا أورستد وفارادى الأساس الذى بنيت عليه قوانين ماكسويل وجميع النتائج التى حصلنا عليها حتى الآن نتجت عن الدراسة الدقيقة لهذه القوانين معبراً عنها بلغة المجال . ويعد الاكتشاف النظرى الذى يعين السرعة التى تنتشر بها الموجة الكهرمغناطيسية على أنها سرعة الضوء من أعظم الاكتشافات فى تاريخ العلم .

وقد حققت التجربة ماتنبأت به النظرية . فمنذ أكثر من خمسين عاما ، أثبت هرتز بالتجربة لأول مرة وجود الموجات الكهرمغناطيسية وحقق عملياً أن سرعتها تساوى سرعة الضوء . وفى هذه الأيام يشاهد ملايين الناس الموجات الكهرمغناطيسية ترسل وتستقبل . والواقع أن أجهزتهم أعقد بكثير جداً من ذلك الذى استعمله هرتز ، وهى تشعر بوجود الموجات على بعد آلاف الأميال من مصدرها بدلا من مجرد ياردات قليلة .

المجال والأثير :

تعرف الموجة الكهرمغناطيسية بأنها موجة مستعرضة تنتشر فى الفضاء بسرعة الضوء . ويوحى إلينا وجود سرعة واحدة للأمواج الضوئية والكهرمغناطيسية بضرورة وجود علاقة قوية بين الظواهر الضوئية والكهرمغناطيسية نفسها .

وعند ما كان علينا أن نفاضل بين نظرية الجسيمات والنظرية الموجية ، فضلنا النظرية الموجية لنجاحها فى شرح ظاهرة الحيود . فإذا فرضنا الآن أن الموجة الضوئية هى فى الحقيقة موجة كهرمغناطيسية فإن هذا الفرض لن يؤثر البتة فى تفسيرنا للظواهر الضوئية ، بل على العكس يمكننا من استخلاص نتائج جديدة أخرى . وإذا كان هذا الفرض صحيحاً فلا بد من وجود ارتباط ما بين الخواص الضوئية والكهربائية للمادة ، يسهل استنتاجه من النظرية . ويعتبر إيجاد هذا الارتباط وتحقيقه بالتجارب نصراً مبيناً للنظرية الكهرمغناطيسية .

ويعتبر هذا النصر أيضاً انتصاراً لنظرية المجال ، إذ قد أمكننا تمثيل فرعين

من العلوم مختلفين عن بعضهما بنظرية واحدة . فنظرية ماكسويل تشرح مثلا ظاهرة التأثير الكهربائى وظاهرة انكسار الضوء . وينحصر الاختلاف بين الأضواء التى تشعر بها العين وبين الأمواج الكهرمغناطيسية الأخرى فى أن طول الموجة فى الحالة الأخيرة قد يقصر حتى يصل إلى إطوال الأضواء الأولى وقد يزداد كثيراً كما هى الحال فى الأمواج التى يستقبلها المذياع . أى أن الاختلاف فقط هو فى أطوال الموجات .

وقد كانت النظرية الميكانيكية القديمة تهدف إلى شرح جميع الظواهر الطبيعية على أساس وجود قوى بين الجسيمات المادية . وعلى هذا الأساس ابتدعت فكرة السيال الكهربائى ، إذ كان من العسير على علماء القرن التاسع عشر تصور فكرة المجال ، فكانوا لا يفكرون إلا فى المادة وتطوراتها وكل ما يتعلق بها .

وقد كان الغرض من استحداث فكرة الأثير فى بدء الأمر هو المساعدة فى تفهم الظواهر الطبيعية على الأساس الميكانيكى المادى ، فحاولوا مثلا شرح القوة الموجودة بين جسمين مشحونين بالكهرباء بأسباب خاصة بالجسمين . أما الآن فإنه يجب علينا — طبقاً للآراء الحديثة الخاصة بالمجال — أن نعتبر المجال الموجود بين الشحنتين ، لا الشحنتين نفسهما ، إذا أردنا دراسة تأثيرها . وقد أخذ الاعتقاد بنظرية المجال يزداد قوة ووضوحاً وأخذت النظرية الميكانيكية فى الاضمحلال وأدرك العلماء أن علم الطبيعة قد أشرف على فجر عهد جديد تحتل فيه نظريات المجال مكاناً كبيراً وأصبحنا الآن مثلا ننظر إلى المجال الكهرمغناطيسى كنظرنا إلى شىء ملموس تماماً مثل المكتب الذى نجلس إليه .

ومن الإنصاف أن نذكر أن نظرية المجال الحديثة لم تقض على كل آثار النظرية الميكانيكية بل إنها قد أظهرت بعض محاسن هذه النظرية الأخيرة فضلا عن مواطن الضعف فيها . ولسنا نقصد فى كلامنا هذا نظريات السيال والمجال الكهربائيين فقط بل كل الظواهر الطبيعية ، فما زلنا مثلا نعترف بوجود الشحنة الكهربائية نفسها رغماً عن اعتقادنا — حسب نظرية المجال — بأن الشحنة ما هى إلا مصدر للمجال الكهربائى . وكذلك أيضاً ما زلنا نعتقد فى صحة قانون كولوم واحتواء

معادلات ماكسويل له . وهكذا يمكننا استخدام بعض المعتقدات القديمة فى حدود لا يجب أن نتعداها .

ولكى نفهم حقيقة هذا التغيير يجب أن نذكر أن تكوين نظرية جديدة لا يشبه هدم كوخ حقير وبناء ناطحة سحاب بدلا منها بل أقرب شبهاً بحال رجل يتسلق جبلا فيتسع أفق نظره ويرى آفاقاً جديدة كلما ازداد ارتفاعه ، ويرى طرقاً ومسالك جديدة تصل بين البقاع الموجودة فى سفح الجبل مما كان يتعذر عليه رؤيتها لو لم يبرح هذا السفح .

وفى الحقيقة أنه قد مضى زمن طويل قبل أن يستطيع الناس فهم الكنه الحقيقى لمعادلات ماكسويل ، فكان العلماء أولا يشبهون المجال بالمادة ويحاولون استخدام فرض الأثير لفهم هذه المعادلات . ولكن الزمن كان خير كفيل بإنجاح فكرة المجال فسرعان ما تعاقبت انتصاراتها وزاد إيمان الناس بها وفقدت تبعاً لذلك نظرية الأثير الكثير من بهائها ورونقها وأخذ الناس فى الانصراف عنها . وهكذا أصبح علينا الآن أن نسلم بأن الفراغ له خاصية السماح الأمواج الكهرمغناطيسية بالمرور . وقد يحدث بين الحين والآخر أن نذكر عرضاً كلمة الأثير ، ولن تعنى هذه الكلمة أكثر من الصفة الطبيعية التى ذكرناها الآن والتى تميز الفراغ . ونرى من هذه التطورات الكثيرة التى لازمت فكرة الأثير منذ ولادتها فلم يصبح الآن يعنى وسطاً مكوناً من جسيمات مادية بل مجرد صفة طبيعية للفراغ .

وللأثير دور كبير أيضاً فى نظرية النسبية سنتكلم عنه فيما بعد .

السقالة الميكانيكية :

لنرجع الآن قليلاً إلى الوراء ونعتبر قانون جاليليو للقصور الذاتى :

كل جسم يظل فى حالة سكون أو حركة منتظمة فى خط مستقيم ما لم تؤثر عليه قوة خارجية .

لنتصور أنفسنا الآن نشاهد عالماً يريد تحقيق صحة هـذا القانون أو عدمها بواسطة التجارب العملية . سيدفع العالم كرات صغيرة على سطح منضدة أفقيـة ملساء ، وسيلاحظ أن حركة الـكرات تصبح أكثر انتظاماً كلما قل مقـدار الاحتكاك بين الـكرة وسطح المنضدة . لندع الآن العالم يجرى تجاربه ولنتصور أن الحجرة قد أخذت فى الدوران فجأة فى مستوى أفقى حول محور فى وسطها . سيشاهد العالم أن الـكرة ذات الحركة المنتظمة أخذت فى حركتها تقترب من طرف المنضدة الأكثر قرباً من جدران الحجرة أى الأكثر بعداً عن مركز الحجرة ومحور الدوران . بل إن العالم نفسه سيشعر بقوة غريبة تدفعه نحو جدران الحجرة ، سيحس بنفس الشعور الذى يعانيه راكبوا القطار عند ما يتحرك هـذا الأخير فى مسار دائرى ، أو كشعور راكب الأرجوحة السريعـة الدوران . وفى هذه الحالة سيجد العالم أنه لا مندوحة من نبذ قانون القصور الذاتى وجميع القوانين الميكانيكية فى عالمه — أى حجرته — السريعة الدوران حول المحور . فإذا تصورنا شخصاً ولد وقضى كل حياته داخل هذه الحجرة الدائرة فإن قوانين الحركة التى سيشاهدها داخل الحجرة ستختلف تمام الاختلاف عن القوانين التى تخضع لهـا الأجسام خارج الغرفة . ولـكن إذا دخل امرؤ الحجرة وهو عالم تماماً بحركتها الدورانية وملم بقوانين الطبيعة فإنه سيفسر عدم صلاحية القوانين الميكانيكية داخل الحجرة بأنه راجع لهذا الدوران ، ويمكنه إجراء بعض تجارب لمعرفة هذه الحركة الدورانية .

ولعلك تتساءل عن سبب اهتمامنا بالحجرة السريعة الدوران ؟ والجواب على ذلك هو أننا — نحن معشر سكان الـكرة الأرضية — فى نفس وضع العالم الذى قضى عليه بالبقاء داخل الحجرة الدائرة طيلة حياته ، إذ أننا قد أدركنا منذ عهد كوبرنيكوس أن الأرض تدور حول نفسها وحول الشمس أيضاً فى نفس الوقت فإذا كان العالم الطبيعى لم يستطع إثبات قوانين الميكانيكا داخل الحجرة الدائرة فإننا أيضاً لن نستطيع تحقيقها على سطح الأرض ولـكن حيث أن حركة الأرض الدورانية بسيطة نسبياً فإن تعديل قوانين الميكانيكا سيكون طفيفاً . وهناك تجارب

كثيرة تدلنا على وجود اختلاف بسيط فى قوانين الميكانيكا مما يدلنا على صحة الفرض بحركة الأرض الدورانية .

ومما يدعو إلى الأسف أنه ليس فى استطاعتنا اختيار مكان بين الشمس والأرض يمكننا البقاء به لاختبار صلاحية قوانين الميكانيكا وحتى نرى بأعيننا حركة الأرض الدورانية . وإذن فلا مفر من أن نجرى تجاربنا على سطح الأرض التى نقضى حياتنا فيها ، ويمكننا التعبير عن هذه الحقيقة رياضياً بقولنا إن الأرض هى محاورنا الاحداثية » .

ولكى نفهم معنى هذه العبارة الرياضية سنذكر المثال التالى : إذا ألقينا حجراً من قمة برج عال فإنه يمكننا تعيين ارتفاع هذا الحجر عن سطح الأرض عند أى لحظة أثناء سقوطه ، وذلك بتثبيت مقياس كبير بجوار البرج نستطيع بواسطته تعيين هذه الارتفاعات . والمفروض طبعاً أن البرج والمقياس ليسا مصنوعين من المطاط أو أى مادة يحتمل أن يتغير شكلها أثناء التجربة . وفى الحقيقة أن ما نحتاج إليه لإجراء هذه التجربة — أى تعيين ارتفاعات الحجر أثناء سقوطه — لا يعدو المقياس المتماسك وساعة دقيقة فقط . فإذا توفر لدينا ذلك أمكننا تجاهل شكل البرج ، بل وحتى مجرد وجوده . وعند إجراء هذه التجربة لا نذكر عادة وجود المقياس والساعة حيث أن وجودها مفروض بالبديهة ولا بد منه لتحقيق قانون جاليليو للأجسام الساقطة . وبفضل هذا الجهاز البسيط — أى المقياس والساعة — يمكننا تحقيق هذا القانون الميكانيكى لدرجة معينة من الدقة . وسنرى أن هناك فرقاً بين النتائج المستنتجة نظرياً من القانون الميكانيكى وبين النتائج العملية الناتجة من استخدام المقياس والساعة وذلك بسبب دوران الأرض . ويمكننا التعبير عن ذلك رياضياً أيضاً بقولنا : إن قوانين الميكانيكا ، على الصورة التى سبق ذكرها ، لا تتحقق تماماً فى المحاور الاحداثية المثبتة فى سطح الأرض .

ومن الطبيعى أنه يلزمنا فى جميع التجارب الميكانيكية على الإطلاق تعيين أماكن نقط مادية عند لحظات معينة ، كما حدث عند دراستنا للجسم الساقط من قمة البرج . ولكن يجب ألا يغيب عن بالنا أن موضع الجسم الساقط فى أية لحظة

يجب أن ينسب إلى شيء ما كالبرج أو المقياس مثلا ، إذ لا بد من وجود إحداثيات نشير إليها كسقالة ميكانيكية حتى نستطيع تعيين أماكن الأجسام . وهذا ما يحدث عند تعيين أماكن الأفراد والمبانى فى مدينة ما إذ تكون شبكة الطرق والميادين مجموعة احداثية نشير إليها . وعند ما ذكرنا قوانين الميكانيكا فيما سبق لم تهتم بتعيين الاحداثيات ، لأننا بسبب وجودنا على سطح الأرض لن نجد أية صعوبة فى اختيار إحداثيات ما وتثبيتها على سطح الأرض .

ولم نشر بشيء إلى الاحداثيات المتبعة فى جميع القوانين والفروض الطبيعية التى سبق ذكرها حتى الآن ، بل حتى تجاهلنا مجرد وجودها . فمثلا عندما ذكرنا « يتحرك الجسم بانتظام » كان يجب علينا أن نكتب « يتحرك الجسم بانتظام بالنسبة إلى احداثيات معينة » . ولا غرو فقد علمتنا تجربة الحجرة السريعة الدوران أن نتائج التجارب الميكانيكية قد تتوقف على الاحداثيات المختارة .

وإذا فرضنا أن لدينا مجموعتين من الإحداثيات تدور كل منها بالنسبة للأخرى فإن قوانين الميكانيكا لن تتحقق فى كليهما معاً . فإذا اتخذنا سطح الماء الساكن فى حوض سباحة مثلا أساساً لأحداثياتنا فإن سطح الماء فى حوض سباحة آخر — يتحرك حركة دورانية سريعة بالنسبة للأول — لن يكون أفقياً فى هذه الأحداثيات ، بل يتخذ الشكل الذى يأخذه سطح اللبن فى كوب عند ما نحركه بواسطة ملعقة صغيرة .

وعند ما بدأنا صياغة قواعد الميكانيكا فاتنا أن نذكر شيئاً مهما ، ألا وهى الاحداثيات التى تتحقق فيها هذه القوانين . لنسرع بالمرور على هذه النقطة ولنقدم الفرض التقريبى بأن هذه القوانين تتحقق فى كل الاحداثيات المثبتة فى سطح الأرض . وبذلك تتحدد جميع نتائجنا بالنسبة إلى أحداثيات معينة . هذا على الرغم من أن سطح الأرض لا يصلح تماماً لكى نتخذه كأساس لمجموعة احداثية .

لنفرض إذن أن لدينا مجموعة من الأحداثيات تتحقق فيها قوانين الميكانيكا ، ولنتساءل الآن عما إذا كانت هذه المجموعة هى الوحيدة ؟ لنحاول اتباع أحداثيات

أخرى كقطار أو سفينة أو طائرة مثلا متحركة بالنسبة للأرض ولنبحث الآن فيما إذا كانت قوانين الميكانيكا ستظل نافذة بشكلها المألوف فى هـذه الأحداثيات الجديدة . وتدلنا أمثلة القطار المتحرك فى مسار منحن أو السفينة المدفوعة بعاصفة أو الطائرة التى تدور حول نفسها على أن قوانين الميكانيكا هذه لن تكون صحيحة على الاطلاق . لنبدأ الآن بدراسة تجربة بسيطة تعتبر فيها مجموعة أحداثية معينة متحركة بسرعة منتظمة بالنسبة لأحداثياتنا المفروضة ، أى التى تتحقق فيها قوانين الميكانيكا ؛ أى كقطار أو سفينة تتحرك بسرعة ثابتة فى خط مستقيم . تدلنا المشاهدات العملية فى مثل هذه الأحوال على أن التجارب التى سنقوم بها فى القطار أو السفينة ستعطينا نفس النتائج التى نحصل عليها لو أجرينا هذه التجارب على سطح الأرض . ولكن إذا وقف القطار على حين غرة أو ازدادت سرعته فجأة أو إذا اشتد هياج البحر فإننا نشاهد حدوث ظواهر غريبة . فنشاهد سقوط الحقائب والأمتعة فى القطار ، ويختل توازن الموائد والمقاعد وتتناثر هنا وهناك فوق السفينة ويشعر المسافرون بدوار البحر . ويدلنا ذلك كله من الناحية الطبيعية العلمية بأن قوانين الميكانيكا لا يمكن أن تتحقق أو تطبق على مثل هذه الأحداثيات ، أى أن هذه الأحداثيات تعتبر غير ملائمة .

ويمكننا التعبير عن هذه النتيجة بنظرية جاليليو النسبية : إذا كانت قوانين الميكانيكا صحيحة فى أحداثيات معينة ، فإنها ستظل متحققة فى أية أحداثيات أخرى متحركة بسرعة منتظمة بالنسبة للأولى . فإذا كان لدينا مجموعتان من الأحداثيات تتحركان بغير انتظام بالنسبة لبعضهما فإن قوانين الميكانيكا لا يمكن أن تتحقق فى كليهما . وتسمى الأحداثيات التى تتحقق فيها قوانين الميكانيكا بأحداثيات القصور الذاتى .

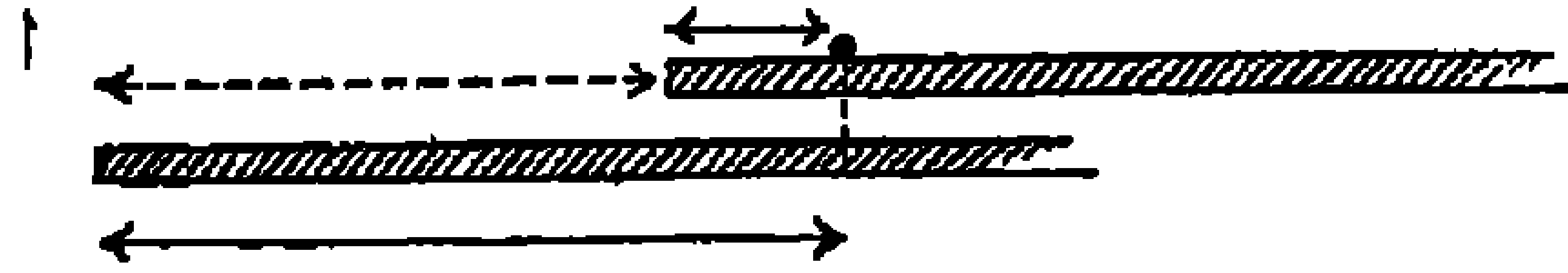
لنعتبر الآن مجموعتين احداثيتين فى نقطة معينة ، لنفرض أن إحداهما بدأت تتحرك بسرعة منتظمة بالنسبة للأخرى ، كقطار أو سفينة تتحرك بالنسبة إلى سطح الأرض مثلا . سنجد أننا نستطيع تحقيق قوانين الميكانيكا لنفس الدرجة من الدقة فى كل من الأرض والقطار أو السفينة المتحركين بانتظام . ولكن إذا وقع

حدث ما ، وحاول مشاهدان كل منهما فى مجموعة أحداثية مختلفة ، تسجيل نتائجه فإن المسألة تصبح أكثر تعقيداً . فلنفرض الآن أننا حاولنا دراسة حركة نقطة مادية من مجموعتين أحداثيتين مختلفتين كالأرض وقطار متحرك بسرعة منتظمة مثلا . نظراً إلى أن هاتين المجموعتين هما من نوع أحداثيات القصور الذاتى ، فإنه يكفى أن نعلم النتائج التى سجلها أحد المشاهدين والسرعة النسبية ، وأما كن المجموعتين عند لحظة معينة لكى نستطيع أن نوجد النتائج التى سيجدها المشاهد الآخر . إذ أنه من المهم جداً لوصف الأحداث أن نعرف كيف ننتقل من مجموعة أحداثية إلى أخرى ، حيث أنهما متكافئتان ومناسبتان لوصف أحداث الطبيعة ، وبذلك نستطيع معرفة النتائج التى يحصل عليها مشاهد فى إحدى المجموعتين من تلك التى يجدها آخر فى المجموعة الثانية .

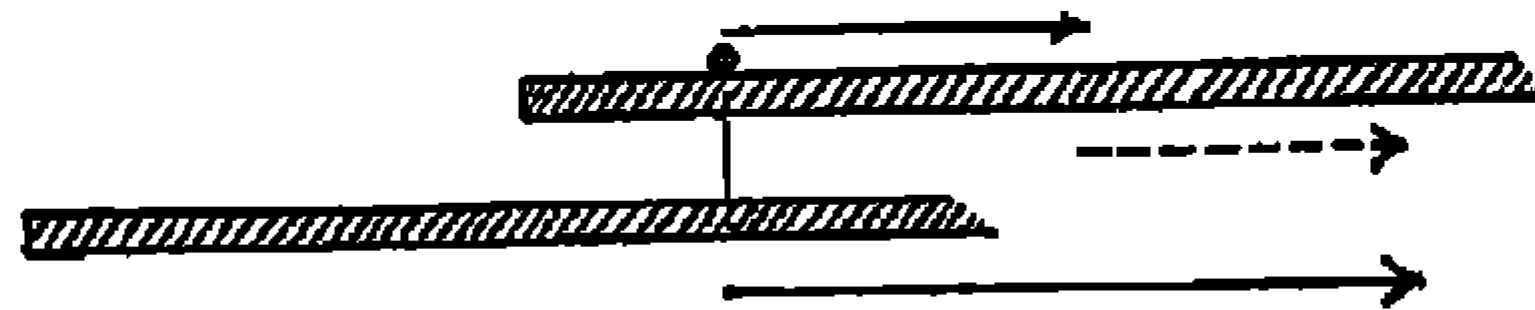
لندرس الآن المسألة من الناحية المجردة دون ذكر سفينة أو قطار أو غيره ، ولنعتبر الحركة فى خطوط مستقيمة . سنفرض أن لدينا مقياساً متماسكا وساعة دقيقة . وفى حالة الحركة فى خط مستقيم سيكون القياس هو مجموعتنا الأحداثية ، كما كان مقياس البرج فى تجربة جاليليو . ومن الأسهل دائماً أن نعتبر مجموعاتنا الأحداثية فى حالة الحركة فى خط مستقيم كقضبان مقاييس متماسكة ، وفى حالة الحركة فى الفراغ ، كسقالة متماسكة مصنوعة من قضبان رأسية وأفقية .

لنفرض أن لدينا مجموعتين من الأحداثيات ، أى مقياسين متماسكين ولنمثلهما بخطين مستقيمين أحدهما فوق الآخر ، ولنطلق عليهما الأحداثيات العليا والسفلى ولنفرض أيضاً أن هاتين المجموعتين تتحركان بسرعة نسبية معينة كل بالنسبة للآخر أو بعبارة أخرى أن أحد المستقيمين ينزلق فوق الآخر . ولعله من الأنسب أن نفرض أن هذين القياسين لهما طولان لانهائيان ، وأنه ليس لدينا سوى ساعة واحدة ، حيث أن الزمن يسير بمعدل واحد فى كلا المجموعتين . ولنفرض أنه عند بدء التجربة كانت نقطتا ابتداء المقياسين منطبقتين ، أى أنه عند هذه اللحظة كانت لهما نفس أرقام التدريج ولكن هذه الأرقام ستختلف عند الحركة بالطبع . لنفرض الآن أن هناك نقطة مادية مثبتة فى القياس العلوى وإذن فسيكون الرقم المحدد

لموضعها على المقياس العلوى ثابتاً لا يتغير بمرور الزمن فى حين أن الرقم المعين لموضعها على المقياس السفلى سيتغير باستمرار . دعنا نستبدل العبارة « الرقم المعين لموضع النقطة على المقياس » باللفظ المرادف « أحداثيها » .



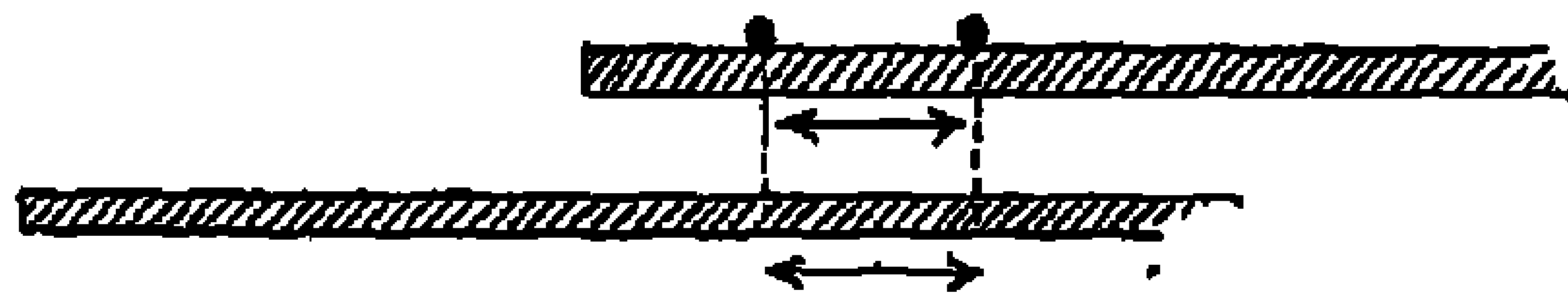
وكما هو مبين فى الشكل يمكننا القول بأن أحداثى الجسيم المادى فى المجموعة الأحداثية السفلى (أى الطول ا حـ) يساوى أحداثى الجسيم فى المجموعة العليا (أى ب حـ) مضافا إليه احداثى نقطة الابتداء ، (أى ا ب) . أى أننا يمكننا دائما تقدير موضع جسيم فى مجموعة أحداثيات معينة إذا عرفنا موضعه فى مجموعة أخرى . ولهذا السبب يجب علينا أن نعرف الأوضاع النسبية للمجموعتين الأحداثيتين فى كل لحظة . وليعذرنا القارئ لهذا الإسهاب فى هذه النقطة البسيطة ولذلك لفائدته فيما سيلى بعد ذلك . ويجدر بنا أن نلاحظ الفرق بين تعيين مكان نقطة ما ووقت وقوع حدث معين ، إذ أن لكل شاهد مقياسة الخاص به (أى مجموعته الأحداثية) فى حين أن ليست هناك سوى ساعة توقيت واحدة ، أى أن الزمن يبدو كشىء مطلق واحد بالنسبة لجميع المشاهدين فى المجموعات المختلفة .



وسنذكر الآن مثلا آخر : يتجول رجل على سطح سفينة كبيرة بمعدل ثلاثة أميال فى الساعة ، أى أن هذه هى سرعته النسبية بالنسبة إلى السفينة ، أو بعبارة أخرى بالنسبة إلى أحداثيات مثبتة فى السفينة فإذا كانت سرعة السفينة ثلاثين ميلا فى الساعة بالنسبة إلى الشاطىء وإذا كان اتجاه سرعة السفينة وحركة الرجل المنتظمتين فى نفس الاتجاه فإن سرعة الرجل تكون ثلاثة وثلاثين ميلا فى الساعة بالنسبة إلى مشاهد قابع بالشاطىء أو ثلاثة أميال بالنسبة إلى شاهد جالس على ظهر السفينة . أى أننا يمكننا التعبير عن هذه الظاهرة بشكل عام كما يلى « تكون سرعة

نقطة مادية بالنسبة للأحداثيات السفلى مساوية لسرعتها بالنسبة للاحداثيات العليا مضافا إليها أو مطروحا منها سرعة الأحداثيات العليا على حسب ماإذا كانت السرعتان فى اتجاه واحد أو اتجاهين مختلفين » وإذن فليست الأوضاع فقط بل وكذلك السرع هى التى يمكننا دائماً تحويل قيمها من أحداثيات معينة إلى أخرى إذا علمنا سرعة المجموعتين الإحداثيتين النسبية . أى أن الأماكن والسرع هى أمثلة للكميات التى تختلف قيمها باختلاف الأحداثيات وترتبط ببعضها بواسطة قوانين تحويل .

ومع ذلك فهناك كميات لاتتغير قيمها فى كلا المجموعتين الأحداثيتين وإذن فلا نحتاج إلى قوانين تحويل . لنعتبر مثلا نقطتين مثبتتين على القياس العلوى ولنقس المسافة بينهما . ستكون هذه المسافة هى الفرق بين احداثيي النقطتين اللتين تنحصر بينهما . وإذا أردنا تعيين أماكن هاتين النقطتين بالنسبة لإحداثيات أخرى فاننا سنحتاج إلى استخدام قوانين تحويل . ولكن حينما نهتم بالفرق بين موضعى النقطتين فإن تأثير الإحداثيات المختلفة يتلاشى كما هو موضح فى الرسم . وإذن فالمسافة بين نقطتين هى « كمية لامتغيرة » أى أنها لاتتوقف على طريقة اختبار الأحداثيات .



والمثال الثانى للكمية التى لاتتوقف على الاحداثيات هو التغير فى السرعة وهى كمية مألوفة فى الميكانيكا . سنفرض مرة أخرى أن لدينا مشاهدين يلاحظان حركة نقطة مادية فى خط مستقيم . سيكون التغير فى سرعة هذه النقطة بالنسبة لكل مشاهد فى مجموعته ، هو فرق بين سرعتين وبذلك سيختفى كل أثر للسرعة النسبية المنتظمة للمجموعتين ، عند حساب هذا الفرق . وإذن ينتج أن التغير فى السرعة هو كمية « لامتغيرة » على أساس الفرض بأن الحركة النسبية للمجموعتين منتظمة . أما فى الحالة التى تكون فيها السرعة النسبية متغيرة فإن التغير فى السرعة

سيختلف فى كلا من المجموعتين بسبب اختلاف السرعة النسبية بين المقياسين المثلين للمجموعتين الاحداثيتين .

وهاك المثال الأخير : لنفرض أن لدينا نقطتين ماديتين بينهما قوة تتوقف فقط على المسافة بينهما . فى حالة السرعة النسبة المنتظمة . ستظل المسافة بين النقطتين وكذلك القوة ثابتة ، وحيث أن قانون نيوتن يربط بين القوة والتغير فى السرعة ، فإننا نستنتج أن هذا القانون سيتحقق فى كلا المجموعتين . أى أننا قد توصلنا مرة أخرى إلى النتيجة التى حققتها المشاهدات اليومية وهى : إذا تحققت قوانين الميكانيكا فى مجموعة احداثية فإنها تستمر كذلك فى جميع الاحداثيات المتحركة بسرعة منتظمة بالنسبة للمجموعة الأولى .

وقد استخدمنا فى أمثلتنا السابقة الحركة فى خط مستقيم حيث يمكننا تمثيل المجموعات الاحداثية بمقاييس متماسكة ، ولكن النتائج التى حصلنا عليها صحيحة وعامة ويمكننا تلخيصها فيما يلى :

١ — ليست لدينا أية وسائل لايجاد مجموعات احداثية قاصرة فاننا نستطيع تكوين عدد لانهائى منها ، حيث أن كل المجموعات الإحداثية التى تتحرك بانتظام بالنسبة لبعضها تصبح احداثيات قاصرة ، إذا كانت إحداها كذلك .

٢ — زمن وقوع حدث ما ثابت فى جميع المجموعات الاحداثية ، ولكن الاحداثيات والسرع تختلف على حسب قوانين التحويل بين الاحداثيات .

٣ — على الرغم من اختلاف السرع والإحداثيات عند تحويلها من مجموعة إلى أخرى ، فإن القوة والتغير فى السرع وبالتالى قوانين الميكانيكا تظل ثابتة بالنسبة إلى قوانين التحويل .

وسنطلق على قوانين التحويل الخاصة بالاحداثيات والسرع فى الميكانيكا الكلاسيكية : قوانين التحويل الكلاسيكية أو باختصار «التحويل الكلاسيكى» .

الأثير والحركة :

تعتبر نظرية جاليليو النسبية صحيحة بالنسبة للظواهر الميكانيكية ، أى أن قوانين الميكانيكا تتحقق فى جميع المجموعات الإحداثية القاصرة المتحركة بالنسبة لبعضها . ولعلنا نتساءل عما إذا كان من الممكن تعميم تلك النظرية لكى تشمل أيضا الظواهر غير الميكانيكية ولاسيما تلك التى يلعب فيها المجال دورا كبيرا . وسيؤدى بنا البحث لإجابة هذا السؤال إلى مبادىء النظرية النسبية .

فمن المعلوم مثلا أن سرعة الضوء فى الفراغ أو بعبارة أخرى فى الأثير تبلغ ١٨٦٠٠٠ ميلا فى الثانية وأن الضوء هو عبارة عن مجموعة من الموجات الكهرمغناطيسية تنتشر خلال الأثير . ونعلم كذلك أن المجال الكهرمغناطيسى مصحوب دائما بقدر معين من الطاقة يمكننا إدراكها بمجرد اشعاعها .

وعلى الرغم من أننا نعلم حق العلم المصاعب العديدة التى تكتنف كنه التركيب الميكانيكى للأثير فإننا سنستمر مؤقتا فى الاعتقاد بأن الأثير هو وسط تنتشر فيه الأمواج الكهرمغناطيسية .

لنفرض الآن أننا جلوس فى حجرة زجاجية مغلقة معزولة عن العالم الخارجى فلا يمكن للهواء أن يتسرب منها أو إليها ، ثم أخذنا فى تبادل الأحاديث ، أى أننا أخذنا فى توليد وإرسال أمواجاً صوتية تنتشر من مصادرها (أفواهنا) بسرعة الصوت فى الهواء . فإذا لم يوجد الهواء بين الفم المتحدث والأذن المنصتة ، فإننا لن نسمع أبداً أى صوت . وقد أثبتت التجارب العملية أن سرعة الصوت ثابتة فى جميع الاتجاهات إذا كان الهواء ساكنا فى المجموعة الاحداثية التى اخترناها .

لنفرض أن الحجرة أخذت الآن فى التحرك بسرعة منتظمة خلال الفضاء وأن هناك شاهدا خارج الغرفة يرى من خلال جدرانها الزجاجية كل مايحدث داخلها ، وأن هذا الشاهد سيحاول قياس سرعة الصوت الصادر فى الغرفة المتحركة بالنسبة إلى احداثيات مثبتة فى مكان وجوده . أى أننا سنعود مرة أخرى إلى

الـكلام عن كيفية تعيين السرعة فى أحداثيات معينة إذا كانت معروفة فى مجموعة أخرى . سيدعى المشاهد الداخلى (أى داخل الغرفة) أن سرعة الصوت بالنسبة إليه ثابتة فى جميع الاتجاهات فى حين أن المشاهد الخارجى سيقرر أن سرعة الصوت الصادر فى الحجرة المتحركة ، والتى قيست فى مجموعته الاحداثية ، ليست ثابتة فى كل الاتجاهات ، إذ أن قيمتها ستزيد عن القيمة القياسية لسرعة الصوت فى اتجاه حركة الغرفة وستقل فى الاتجاه المضاد .

ومن السهل الوصول إلى هـذه النتائج بواسطة التحويلات الـكلاسيكية (يمكننا تحقيقها أيضاً بالتجربة) . إذ أن الحجرة تحمل معها الوسط المادى . أى الهواء ـ الذى تنتشر فيه أمواج الصوت وإذن ستختلف سرعة الصوت بالنسبة للمشاهدين الداخلى والخارجى .

ويمكننا استخلاص نتائج أخرى من نظرية الصوت باعتباره كموجات تنتشر خلال وسط مادى . فمثلاً يمكننا إيجاد طريقة ـ ليست الوحيدة دون شك ـ للتهرب من سماع كلام لانود سماعه ، وذلك بأن نبتعد عن المتكلم بسرعة أكبر من سرعة الصوت بالنسبة للهواء المحيط به . وبذا لن تتمكن موجات الصوت غير المرغوب فيها من اللحاق بنا . وكذلك إذا سهى علينا التنبه لـكلمة سبق أن قيلت ونود معرفتها ، علينا أن نجرى بسرعة أكبر من سرعة الصوت كى تتمكن من اللحاق بالموجات التى تـكون الـكلمة المراد سماعها . وليس فى هـذين المثالين ما يصعب تصديقه سوى أن علينا أن نجرى بسرعة تبلغ أربعمائة ياردة فى الثانية ، ولا شك أن التطور الصناعى الحديث سيجعل تحقيق ذلك فى حيز الإمكان . وتنطلق الرصاصة من فوهة بندقية بسرعة أكبر من سرعة الصوت ، فإذا تحرك شخص ما مع هذه الرصاصة بسرعتها فإنه لن يسمع صوت انطلاقها من البندقية على الإطلاق .

وتتميز جميع هذه الأمثلة بطابع ميكانيكى بحت ، ولذا فقد يخطر ببالنا أن نضع الآن هذه الأسئلة المهمة ! أيمكننا إجراء تجارب مشابهة لتلك التى قمنا بها فى حالة الأمواج الصوتية مع أمواج الضوء ؟ وهل تنطبق نظرية جاليليو النسبية والتحويل الـكلاسيكى على الظواهر الضوئية والـكهربائية ؟ ولعله من المخاطرة أن

نجيب على هـذه الأسئلة ببساطة بقولنا « نعم » أو « لا » قبل أن نتفهم هذه المسائل حق الفهم .

فى حالة الموجات الصوتية الصادرة داخل الحجرة المتحركة بانتظام ، بنينا نتائجنا على الاعتبارات الآتية :

تحمل الحجرة معها ما بداخلها من الهواء الذى تنتشر فيه أمواج الصوت .

ترتبط السرعتان الشاهدتان فى مجموعتين إحداثيتين ـ تتحرك كل منهما بسرعة منتظمة بالنسبة للأخرى ـ بقوانين التحويل الكلاسيكية .

فإذا اعتبرنا الآن الأمواج الضوئية بدلاً من الأمواج الصوتية فإن الحالة تتغير إذ أن الشخصين لن يتكلما بل سيتراسلا بواسطة الأشارات أو الموجات الضوئية المنتشرة فى جميع الاتجاهات . فلنفرض إذن أن مصادر الضوء مثبتة فى الحجرة باستمرار وأن الموجات الضوئيـة تنتقل فى الأثير كما تنتقل أمواج الصوت فى الهواء .

ولـكن هل يتحرك الأثير مع الحجرة كما فعل الهواء ؟ وبما أنه ليس لدينا صورة ميكانيكية عن الأثير فإنه من الصعب جداً الإجابة على مثل هذا السؤال . إذا كانت الغرفة مغلقة فإن ما بداخلها من الهواء سيتحرك معها . ومن الواضح أنه ليس هناك أى معنى لمعاملة الأثير بالمثل ، حيث أن الأثير يخترق جميع الأجسام المادية ، فليست هناك حواجز تقف دونه . وفى هذه الحالة ستمثل الحجرة المتحركة مجموعة أحداثيات متحركة مثبت بها مصدر ضوئى . ومع ذلك فليس هناك مايمنعنا من أن نتصور أن الحجرة المتحركة والحاملة لمصدر الضوء ، تحمل أيضاً معها الأثير ، تماماً كما كانت الحجرة المغلقة تحمل معها مصدر الصوت والهواء . ولـكن يمكننا أيضاً تصور العـكس ؛ أى أن الحجرة تتحرك خلال الأثير تماماً كما تتحرك سفينة خلال بحر عديم المقاومة للحركة ، فلا تحمل معها أى جزء من الوسط بل تتحرك خلاله فقط . فى الحالة الأولى تحمل الحجرة الأثير مع مصدر الضوء وبذا تصبح الحالة مشابهة تماماً للحالة الصوتية وبذلك سنحصل على نتائج مشابهة . أما فى الحالة الثانية فإن الغرفة المتحركة الحاملة لمصـدر الضوء لن تحمل معها الأثير وبذلك

ستنعدم المشابهة مع الحالة الصوتية ولا يمكننا إذن تطبيق نتائج الحالة الصوتية على حالة الأمواج الضوئية . وهاتان الحالتان هما الاحتمالان النهائيان . وطبيعي أنه يمكننا الاسترسال فى الخيال فنفرض وجود الحالة الصعبة التى فيها تعطى الحجرة الحاملة للمصدر حركة جزئية للأثير . ولكن ليس هناك ما يجعلنا ندرس هذه الحالات المعقدة قبل أن نبحث فيما إذا كانت التجارب العملية تؤيد إحدى الحالتين النهائيتين البسيطتين .

وسنبدأ الآن بدراسة إحدى هاتين الحالتين فنفرض أن الغرفة المتحركة تحمل معها الأثير وأن مصدر الضوء مثبت داخلها . فإذا كانت قاعدة التحويل لسرعات الموجات الصوتية صحيحة فإننا يمكننا معاملة الموجات الضوئية بالمثل . وليس هناك ما يدعو إلى الشك فى صحة قوانين التحويل التى تنص على أن السرع تضاف إلى بعضها فى حالات وتطرح من بعضها فى أخرى . فنفرض إذن أن الأثير يتحرك مع الحجرة وأن قوانين التحويل صحيحة . فإذا ضغطنا الآن مثلا زر كهربائى لإضاءة مصدر الضوء الموجود بالحجرة ، فإن موجات الضوء ستتحرك بسرعة ١٨٦٠٠٠ ميلا فى الثانية . وبما أن المشاهد الخارجى سيلاحظ حركة الحجرة ، وبالتالى كذلك حركة المصدر ، المثبت فيها والأثير — الذى يحمل موجات الضوء — والذى تدفعه الحجرة على الحركة معها ، فإن استنتاجاته ستكون بأن سرعة الضوء — مقاسة فى أية مجموعة أحداثية خارجية — ستختلف باختلاف اتجاه الحركة . وستكون قيمة السرعة أكبر من القيمة القياسة إذا قيست فى اتجاه الحركة وأقل منها إذا قيست فى الاتجاه المضاد . أى أننا فى حالة الحجرة المتحركة والمثبت بها مصدر الضوء والتى تحمل معها الأثير قد توصلنا إلى النتيجة الآتية : تتوقف سرعة الضوء على سرعة المصدر نفسه ، إذا فرضنا صحة قوانين التحويل . أى أن سرعة الضوء الذى يصلنا من مصدر متحرك تكون أكبر من السرعة القياسية إذا كانت حركة المصدر فى اتجاهنا وأقل منها إذا كانت فى الاتجاه المبتعد عنا .

إذا أمكن لسرعتنا أن تزيد عن سرعة الضوء فإنه يصبح فى إمكاننا الهروب من إشارة ضوئية مقتربة منا . ويمكننا كذلك رؤية أحداث ماضية عند لحاقنا

بالأمواج الضوئية التى سبق ارسالها من قبل . وسنرى هذه الحوادث بترتيب عكسى لنظام حدوثها إذ أننا سنلحق أولا بالموجات المرسلة حديثا ثم المرسلة قبلها وهكذا . وستظهر أمامنا سلسلة الحوادث التى وقعت على سطح الأرض كصور فلم سينمائى بدء فى عرضه من نهايته إلى أوله . وتنتج جميع هذه النتائج من الفرض بأن مجموعة الاحداثيات المتحركة تحمل معها الأثير وبأن قوانين التحويل الميكانيكية تتحقق دائما ؛ أى أن التشابة بين الضوء والصوت يكون تاما فى هذه الحالة .

ولكن ليس هناك مايؤيد صحة هذه الاستنتجات ، بل إن جميع التجارب التى أجريت بقصد تحقيقها قد أتت بنتائج عكسية على خط مستقيم وبشكل لايحتمل الشك . هذا على الرغم من كون هذه التجارب غيرمباشرة بسبب الصعوبات الفنية الجمة الناتجة من كبر قيمة سرعة الضوء . أى أن نتائج هذه التجارب كلها هى :

« لسرعة الضوء نفس القيمة فى جميع الاحداثيات ، غير متوقفة البتة على حركة مصدر الضوء وكيفيتها » .

ولن ندخل هنا فى وصف تفصيلى للتجارب العديدة التى تمكننا من الوصول إلى هـذه النتيجة ، ولكن يمكننا ذكر بعض الاعتبارات التى وإن لم تثبت أن سرعة الضوء لا تتوقف على سرعة المصدر فإنها تجعل هذه الحقيقة مستساغة ومقنعة .

تتحرك الكرة الأرضية وزميلاتها من سيارات المجموعة الشمسية فى حركة دورانية حول الشمس . ولم تعرف حتى الآن أية مجموعة فلكية شبيهة بالمجموعة الشمسية ، ولكن يوجد عدد كبير مما يسمى بالنجوم المزدوجة . والنجم المزدوج هو عبارة عن نجمين يتحركان حول نقطة تسمى بمركز ثقلهما . وقد أثبتت مشاهدة حركة هذه النجوم المزدوجة صحة قانون نيوتن للجاذبية . دعنا نفرض الآن أن سرعة الضوء تتوقف على سرعة مصدره ، فيستنتج من ذلك أن الإشارة أوالشعاع الضوئى القادم من النجم سيتحرك بسرعة أو ببطء حسب قيمة سرعة النجم عند لحظة إرسال الشعاع . وفى هذه الحالة تصبح الحركة (كما نشاهدها) مضطربة ، ويصبح من المستحيل فى حالة النجوم المزدوجة تحقيق قانون الجاذبية التى تسير بمقتضاه مجموعتنا الشمسية .

ولنعتبر تجربة أخرى مبنية على فكرة بسيطة . لنتصور عجلة تدور بسرعة كبيرة ، فطبقا لافتراضنا سيتحرك الأثير مع العجلة المتحركة . فإذا مرت الآن موجة ضوئية قريبا من العجلة الدائرة فإن سرعتها ستتوقف على ما إذا كانت العجلة ساكنة أو متحركة ، حيث أن سرعة الضوء في الأثير الساكن تختلف عن قيمتها في الأثير الذي تدفعه العجلة على الدوران معها ، تماما كما تختلف سرعة الصوت عندما يكون الهواء ساكنا عن قيمتها عند ما تهب رياح عاصفة . ولكننا لم نتمكن عمليا من ملاحظة أي فرق في سرعة الضوء مهما أعددنا من تجارب دقيقة وكانت النتيجة باستمرار ضد الفرض بحركة الأثير . ويمكننا الآن ذكر النتائج التالية التي تؤيدها جميع الاعتبارات والأدلة العلمية .

لا تتوقف سرعة الضوء على حركة مصدر الضوء .

لا يصح لنا أن نفرض أن الأجسام المتحركة تحمل الأثير المحيط بها .

وإذن يجب علينا أن ننبذ جانبا فكرة التشابه بين أمواج الصوت وأمواج الضوء ، وأن نبدأ بدراسة الاحتمال الثاني الذي ينص على أن المادة تتحرك خلال الأثير الذي لا يتأثر بتاتاً بحركة الأجسام . أي أننا سنفرض وجود بحر من الأثير يحوي كل الاحداثيات سواء أكانت ساكنة أم متحركة بالنسبة إليه . ولنهمل الآن مؤقتاً السؤال عما إذا كانت التجارب العملية قد أثبتت صحة هذا الفرض أو عدم صحته ، إذ أنه من الأفضل أن نفهم معنى هذا الفرض الجديد والنتائج التي يمكننا استخلاصها منه .

وهناك مجموعة احداثية ساكنة بالنسة إلى هذا البحر الأثيري . ولا يمكننا — في الميكانيكا — التفرقة بين مجموعة وأخرى من بين المجموعات الإحداثية التي تتحرك بانتظام بالنسبة لبعضها ، وإذن تعتبر جميع هذه المجموعات متشابهة في كل شيء . وإذا كان لدينا مجموعتان احداثيتان متحركتان بالنسبة لبعضهما بسرعة منتظمة فإنه ليس هناك معنى في الميكانيكا للتساؤل عن أيهما المتحرك وأيهما الساكن حيث أن السرعة النسبية هي التي يمكننا مشاهدتها فقط . ولن نستطيع التحدث عن الحركة المنتظمة المطلقة بسبب قاعدة جاليليو النسبية . ما هو معنى القول بأن

للحركة المطلقة ـ فضلا عن الحركة النسبية ـ وجود ملموس ؟ الجواب ببساطة هو أن هناك مجموعة احداثية تكون فيها القوانين الطبيعية مختلفة عن مثيلاتها في المجموعات الاحداثية الأخرى ، وتعنى كذلك أن المشاهد يستطيع أدراك ماإذا كانت مجموعته الاحداثية متحركة أم لا بمقارنة القوانين المتحققة فى مجموعته بمثيلاتها فى مجموعة الاحداثيات الوحيدة التي يمكننا اتخاذها كمجموعة قياسية . وتعتبر هذه الاعتبارات غير مألوفة فى الميكانيكا الكلاسيكية حيث ليس هناك أى معنى للكلام عن الحركة المنتظمة المطلقة بمقتضى قانون جاليليو للقصور الذاتى .

« ماهى الاستنتاجات التى يمكننا الحصول عليها من ظواهر المجال ، إذا فرضنا الحركة فى الأثير ؟ وهذا يعنى أن هناك مجموعة احداثية واحدة مميزة وثابتة بالنسبة للبحر الأثيرى . ومن الطبيعى أنه يجب أن تأخذ بعض قوانين الطبيعة صوراً مختلفة فى هذه المجموعة وإلا فلا معنى للعبارة « الحركة خلال الأثير » وإذا كانت قاعدة جاليليو النسبية صحيحة فلن يكون هناك معنى للحركة خلال الأثير ؛ إذ أن التوفيق مستحيل بين الفكرتين . فإذا وجدت مجموعة احداثية خاصة مثبتة فى الأثير فإنه يحق لنا الكلام عن الحركة أو السكون المطلقين .

وفى الحقيقة أنه ليس من حقنا أن نختار ، فقد حاولنا جاهدين إنقاذ قاعدة جاليليو النسبية بفرض أن المجموعات الأحداثية تحمل الأثير معها فى حركتها ، ولكن ذلك أدى إلى التعارض مع التجارب العملية ، فلم يصبح أمامنا إذن سوى أن ننبذ قاعدة جاليليو النسبية ونعتبر الفرض القائل بأن جميع الأجسام تتحرك خلال البحر الأثيرى الساكن .

وسندرس الآن بعض الاستنتاجات المعارضة لقاعدة جاليليو النسبية والتى تؤيد فكرة الحركة خلال الأثير ، وسنتخيل الآن بعض تجارب نجريها على هذه الاستنتاجات ، بغض النظر عن الصعوبات العملية التى تحول دون تحقيق هذه التجارب ، حيث أن ما يعنينا الآن هى النظريات وليست الصعوبات العملية .

سنعود الآن مرة ثانية إلى حجرتنا السريعة الدوران وإلى المشاهدين الخارجى والداخلى . من الطبيعى أن يتخذ المشاهد الخارجى البحر الأثيرى كمجموعة

أحداثياته ، وهى المجموعة المميزة التى تبلغ فيها سرعة الضوء قيمتها القياسية . وسترسل جميع المصادر الضوئية — الساكنة والمتحركة فى البحر الأثيرى — الضوء منتشراً بنفس السرعة القياسية . لنفرض أن الحجرة وبها المشاهد الداخلى تتحرك خلال الأثير وبأن جدرانها شفافة بحيث تمكن المشاهدين الخارجى والداخلى من قياس سرعة الضوء عند توليد إشارة ضوئيــة وسط الحجرة . فإذا سألنا كلا المشاهدين عن نتائج قياسهما لاقتربت إجابتهما مما يلى :

المشاهد الخارجى : حيث أن مجموعة أحداثياتى مثبتة فى البحر الأثيرى فإن الضوء سيكون له نفس السرعة القياسية ، ولن يعنينى ما إذا كان مصدر الضوء متحركا أم لا ، حيث أن الأثير ثابت لا يتحرك . إن أحداثياتى مميزة عن جميع الأحداثيات الأخرى ويجب أن يكون لسرعة الضوء فيها القيمة القياسية بغض النظر عن اتجاه الأشعة أو حركة المصدر .

المشاهد الداخلى : تتحرك حجرتى خلال البحر الأثيرى ولذلك فإن أحد جدران حجرتى سيبتعد عن الضوء المشع فى حين يقترب منه الجدار المقابل . فإذا كانت حجرتى متحركة فى الأثير بسرعة الضوء نفسه فإن الإشارة الضوئيــة الصادرة من مركز الحجرة لن تصل أبداً إلى الجدار المبتعــد بسرعة الضوء عن الإشارات الضوئية المنبعثة . أما إذا تحركت الحجرة بسرعة أقل من سرعة الضوء فإن موجة صادرة من وسط الحجرة ستصل إلى أحد جوانبها قبل الأخرى ، إذ أن الضوء سيصل إلى الجانب المقترب منه قبــل أن يلحق بالجانب المتراجع أمامه من الناحيــة الأخرى . وإذن على الرغم من أن مصدر الضوء مثبت فى مجموعة أحداثياتى فإن سرعة الضوء لن تــكون لها نفس القيمة فى جميع الاتجاهات أى أنها ستكون أصغر قيمة فى اتجاه حركة الحجرة بالنسبة إلى البحر الأثيرى لأن الجدار فى هذه الحالة سيكون مبتعداً عن الضوء المنبعث ، وستكون قيمتها أكبر فى الاتجاه المضاد لأن الجدار سيقترب من موجات الضوء متلهفاً على لقائها .

ومن ذلك نستنتج أن سرعة الضوء سيكون لها نفس القيمة فى جميــع الاتجاهات فقط فى حالة المجموعة الأحداثية المميزة والمثبتة فى البحر الأثيرى ، أما

فى باقى المجموعات المتحركة بالنسبة إلى البحر الأثيرى فإن السرعة ستتوقف على الاتجاه الذى تقاس فيه السرعة .

وإجراء مثل هذه التجربة السابقة يمكننا من اختبار صحة نظرية الحركة خلال الأثير .

وقد سهلت علينا الطبيعة الأمر بأن وضعت تحت تصرفنا مجموعة متحركة بسرعة مرتفعة جداً ، ونعنى بذلك الكرة الأرضية فى حركتها السنوية حول الشمس . فإذا كانت نظريتنا صحيحة وجب أن تكون سرعة الضوء فى اتجاه حركة الأرض مختلفة عنها فى الوضع العكسى . وفى إمكاننا تقدير هذا الفرق فى السرعة وإعداد تجارب عملية لتقدير قيمته . ومن الطبيعى أن مثل هذه التجارب يجب أن تكون غاية فى الدقة بسبب صغر الفترات الزمنية التى يجب علينا قياسها . وقد توافرت شروط الدقة فى تجربة ميكلسون ومورلى التى وضعت لقياس الاختلاف فى سرعة الضوء بالنسبة لحركة الأرض فى مدارها . وقد كانت نتيجة هذه التجربة قاضية على نظرية البحر الأثيرى الساكن الذى تتحرك خلاله الأجسام ، إذ لم يظهر وجود أية علاقة بين سرعة الضوء واتجاه حركة المصدر . وليست سرعة الضوء هى الكمية الوحيدة التى يجب أن تتوقف على حركة المجموعة الأحداثية ، على أساس نظرية البحر الأثيرى الساكن ، بل هناك كميات مجالية أخرى . وقد باءت بالفشل جميع التجارب التى أجريت بقصد إدراك وجود أى فرق فى سرعة الضوء ولم تصب أى نجاح على الإطلاق فى إظهار ما يثبت وجود أى تأثير لحركة الكرة الأرضية على الظواهر الطبيعية .

وقد أصبحنا الآن فى موقف حرج ! فقد حاولنا وضع فرضين ، ينص الأول على أن الجسم المتحرك يحمل الأثير معه ، ولكن عدم توقف سرعة الضوء على حركة مصدره يناقض هذا الفرض ؛ وكان الفرض الثانى يقول بوجود مجموعة أحداثية مميزة وبأن الأجسام المتحركة لا تحمل الأثير معها . بل تتحرك خلال بحر أثيرى ساكن ، وقد أدى هذا الفرض إلى عدم صحة قاعدة جاليليو النسبية وبأن

سرعة الضوء لا يمكن أن تكون لها نفس القيمة فى كل المجموعات الأحداثية . ولكن هذا يتعارض أيضاً مع التجارب العملية .

وقد ظهرت بعد ذلك نظريات كثيرة بنيت على الاعتقاد بأن الحقيقة قد تكون فى فرض ينحصر بين الفرضين السابقين ، ويتلخص فى أن الأثير يتحرك جزئياً فقط مع الأحداثيات المتحركة . ولكن جميع هذه الفروض باءت بالفشل ! ولم تنجح كل المحاولات التى بذلت لشرح الظواهر الكهرمغناطيسية فى المجموعات الأحداثية سواء أكان ذلك بفرض حركة الأثير أو بكلا الفرضين معاً .

وأدى ذلك كله إلى أن أصبح العلم فى موقف يعتبر من أحرج المواقف التى مرت عليه فى تاريخه الطويل ، إذ أن جميع فروض الأثير لم تؤد إلى نتيجة ما ! وكانت أحكام التجارب العملية دائماً ضد جميع الافتراضات والتأويلات . وإذا أمعنا النظر الآن فيما سبق بسطه من تطورات علم الطبيعة فإننا نرى أن الأثير — عقب ولادته فوراً — قد أصبح مصدر تعب للعائلة الطبيعية . فقد أسبغ عليه العلماء الوصف الميكانيكى أولا ، ولكن سرعان ما نبذ . ثم رأينا بعد ذلك كيف فقدنا الأمل فى نجاح الفرض بوجود بحر أثيرى ساكن وتمييز مجموعة أحداثية تمكننا من تعريف الحركة المطلقة فضلا عن الحركة النسبية المعروفة ، وقد كانت هذه تكفى لتبرير فرض وجود الأثير (فضلاً عن وظيفته فى حمل الأمواج) . وهكذا فشلت جميع المحاولات لجعل الأثير حقيقة ، فلم نلمس له أية خواص ميكانيكية ولم نستطع اكتشاف أو تعريف الحركة المطلقة . ولم يبق لدينا من جميع الصفات التى أضفيت على الأثير سوى تلك التى اخترع من أجلها ، ألا وهى مقدرته على حمل وإرسال الموجات الكهرمغناطيسية . ولعل المصاعب التى لاقيناها بسبب الأثير تدفعنا إلى أن نطرده من مخيلتنا ونحرم على أنفسنا حتى مجرد ذكره . وسنقول بعد ذلك أن فضاء كوننا له الخاصية الطبيعية التى تمكنه من إرسال الأمواج ، وبهذه الطريقة نجنب أنفسنا استخدام الكلمة التى قررنا حذفها . ومن الطبيعى أن حذف كلمة من قاموسنا ليس علاجاً ، فمتاعبنا فى الحقيقة تبلغ من الفداحة حداً لا تحله مثل هذه الطريقة .

ولنسجل الآن الحقائق التى أثبتت التجارب صحتها دون أن نحفل بعد ذلك بتاتاً بمتاعب الأثير :

١ — تبلغ سرعة الضوء دائماً قيمتها القياسية ، ولا تتوقف على حركة مصدر الضوء أو جهاز استقباله .

٢ — تتحقق جميع القوانين الطبيعيـة فى مجموعتين أحداثيتين متحركتين بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضهما ، ولا توجد هناك طريقة لتمييز الحركة المنتظمة المطلقة .

وهناك تجارب كثيرة لتأييد هاتين النتيجتين ولـكن ليست هناك تجربة واحدة لنقضهما . وتعبر النتيجة الأولى عن استمرار ثبوت سرعة الضوء ، وتعمم الثانية قاعدة جاليليو النسبية — التى وضعت للظواهر الميكانيكية — لـكى تشمل جميع الظواهر الطبيعية .

وقد رأينا فى الميكانيكا إذا كانت سرعة النقطة المادية تبلغ قدراً معيناً بالنسبة لمجموعة أحداثية فإن قيمتها بالنسبة لمجموعة أخرى متحركة بسرعة منتظمة بالنسبة للأولى تصبح مختلفة . وهذا ناتج من قواعد التحويل الميكانيكية البسيطة . ومن السهل الاهتداء إلى هـذه القواعد بالفطرة (حركة بحار بالنسبة إلى سفينة ثم بالنسبة إلى الشاطىء) . وقد يخيل إلينا أن هذا القانون ليس به أى خطأ ولـكنه فى الحقيقة يتعارض مع ثبوت سرعة الضوء . أى أننا إذا أضفنا النتيجة التالية :

٣ — يمكن تحويل الأوضاع والسرع من مجموعة أحداثية إلى أخرى بواسطة قانون التحويل الـكلاسيكى . فإن التناقض يصبح واضحاً ، إذ أننا لا يمكننا أن نجمع بين النتائج (١) ، (٢) ، (٣) .

ووضوح التحويل الـكلاسيكى وبساطته يستبعدان أى محاولة لتغييره ، حتى نستطيع القضاء على التناقض الموجود بين (١) ، (٢) من جهة أخرى .

وقد سبق أن رأينا كيف عارضت التجارب العملية أى تغيـير فى النتيجتين (١) ، (٢) ، حيث أن جميع النظريات المتعلقة بحركة الأثير تطلبت تغيير هذين

النتيجتين . وهكذا نلمس مرة أخرى فداحة مصاعبنا وأننا فى حاجة ماسة إلى دليل يهدينا إلى الطريق القويم . ويبدو أن هذا الطريق هو أن نقبل الفرضين الأساسيين (١) ، (٢) وننبذ — على الرغم مما قد يبدو من غرابة ذلك — الفرض الثالث . ويبدأ هذا الطريق الجديد من تحليل المعتقدات الأولية والأساسية ، وسنرى كيف يضطرنا هذا التحليل إلى تغيير آرائنا القديمة ويمكننا من التغلب على مصاعبنا .

الزمن والمسافة والنسبية :

لنضع الآن الفرضين التاليين :

١ — لسرعة الضوء فى الفراغ نفس القيمة فى جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بالنسبة لبعضها بسرعة منتظمة .

٢ — القوانين الطبيعية واحدة فى جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضها .

وتبدأ نظرية النسبية بهذين الفرضين ، ولن نستخدم فيما يلى التحويلات الكلاسيكية لأننا نعلم مما سبق أنها تتعارض مع فرضينا .

ومن الضرورى هنا كما هى الحال فى العلم دائماً أن نتخلص من تحيزنا إلى نظرية بالذات . ونظراً إلى أننا رأينا أن أى تغيير فى (١) ، (٢) يؤدى إلى التعارض مع التجارب العملية فإنه يجب أن تكون لدينا الشجاعة لكى نعلن صحة هذين الفرضين ، ثم نركز بعد ذلك جل اهتمامنا بنقطة الضعف المحتملة ، ألا وهى الطريقة التى تتحول بها الأوضاع والسرع من مجموعة إحداثية إلى أخرى . وسنمضى الآن فى استخراج بعض النتائج من (١) ، (٢) ثم دراسة تعارض الفرضين السابقين مع التحويلات الكلاسيكية والبحث عن المعانى الطبيعية للنتائج التى نحصل عليها .

وسنعود الآن مرة أخرى إلى الحديث عن الحجرة المتحركة ذات الشاهدين الخارجي والداخلي وسنفرض أن إشارة ضوئية قد أرسلت من وسط الحجرة ، ولنسأل الآن المشاهدين عما ينتظر أن يشاهدا على أساس الفرضين السابقين ، مع غض النظر عما سبق قوله عن الوسط الذى ينتقل الضوء خلاله . وسنذكر فيما يلى إجابة المشاهدين :

المشاهد الداخلى : ستصل الإشارة الضوئية المنبعثة من وسط الحجرة إلى جدرانها فى نفس اللحظة ، لأنها تبعد نفس المسافة عن مصدر الضوء ولأن سرعة الضوء ثابتة فى جميع الاتجاهات .

المشاهد الخارجى : ستكون سرعة الضوء فى مجموعتى هى نفسها تلك التى أدركها المشاهد فى المجموعة المتحركة ، ولا يعنينى ما إذا كان مصدر الضوء يتحرك فى مجموعة إحداثية أم لا ، لأن حركته لن تؤثر فى سرعة الضوء على الإطلاق . وكل ما أراه هو إشارة ضوئية متحركة بالسرعة القياسية الثابتة فى جميع الاتجاهات . وأشاهد إحدى جوانب الحجرة تحاول الابتعاد عن الإشارة الضوئية فى حين أن الجانب الآخر يقترب منها ، ولذا فإن الضوء سيصل إلى الجانب الأخير قبل وصوله إلى الأول بلحظات صغيرة جداً إذا كانت سرعة الحجرة صغيرة القدر بالنسبة إلى سرعة الضوء .

ومقارنة استنتاجات هذين المشاهدين تثير الدهشة حقاً ، فإنها تتعارض صراحة مع آراء ومعتقدات علم الطبيعة الكلاسيكى التى ظن العلماء أن أسسه فوق كل شك . فنجد مثلا أن حدثين (أى شعاعين ضوئيين) متحركين بين حائطين يستغرقان وقتاً واحداً بالنسبة لمشاهد مقيم فى نفس المجموعة ويستغرقان وقتين مختلفين بالنسبة لمشاهد آخر خارج الغرفة مع العلم بأن سرعة الضوء ثابتة فى الحالتين .

وقد كان لدينا فى علم الطبيعة الكلاسيكى ساعة واحدة وزمن واحد للمشاهدين فى جميع المجموعات الإحداثية ، فقد كان للزمن وبالتالى ، للقول بأن حدثين وقعا فى آن واحد أو أن أحدهما وقع قبل الآخر أو بعده ، كان لهذه العبارات معان مطلقة

لا تتوقف على أية مجموعة إحداثية . فإذا وقع مثلا حدثان فى وقت واحد فى مجموعة إحداثية معينة فإنهما يجب أن يظلا كذلك فى جميع المجموعات الإحداثية الأخرى .

وينتج من ذلك أن الفرضين السابقين (١) ، (٢) أو بعبارة أخرى نظرية النسبية ، تدفعنا لنبذ هذا الاعتقاد الكلاسيكى . فقد وصفنا حدثين بأنهما وقعا فى لحظة واحدة فى مجموعة إحداثية ورآهما مشاهد آخر فى مجموعة أخرى كأنهما حدثا فى وقتين مختلفين . فعلينا الآن أن نتفهم هذه النتيجة وندرك معنى الجملة « إذا وقع حدثين فى وقت واحد فى مجموعة إحداثية فيحتمل ألا يكونا كذلك فى مجموعة أخرى » .

ولكن ماذا نقصد بقولنا «حدثين وقعا فى وقت واحد فى مجموعة إحداثية» ؟ لعله يبدو أن كل إنسان يدرك بالبديهة معنى هذه العبارة . ولكن لنتوخ الدقة فى التعريفات التى نقولها بعد أن لمسنا مقدار الخطر الناجم من فرط الثقة بالبديهة . ولنجب الآن على السؤال البسيط : ماهى الساعة ؟

نستطيع بفضل شعورنا الفطرى الباطنى بمرور الوقت ، ترتيب إحساساتنا والحكم على أن حدثا ما قد وقع قبل آخر . ولكن لكى نثبت أن الفترة الزمنية بين حدثين هى عشر ثوان مثلا لا بد لنا من ساعة . وباستخدام الساعة يصبح الزمن شيئاً واقعياً . ويمكننا أن نتخذ من أى ظاهرة طبيعية « ساعة » بفرض أن هذه الظاهرة تتكرر نفسها بالضبط مراراً كثيرة . فإذا أخذنا الفترة الزمنية بين بدء ونهاية هذا الحدث (الظاهرة) كوحدة الزمن ، فإننا نستطيع قياس فترات الزمن الاختيارية بتكرار هذه العملية الطبيعية . وجميع الساعات — من الساعه الرملية البسيطة إلى أدق الآلات — مبنية على هذا الأساس ، ففى الساعة الرملية تعرف وحدة الزمن بالفترة التى يأخذها الرمل فى التدفق من الزجاجة العليا إلى السفلى .

لنفرض أننا قلنا أن لدينا ساعتين دقيقتين تعطيان نفس الوقت مستقرتان فى مكانين بعيدين عن بعضهما . ويجب علينا أن نقبل صحة هذه العبارة بغض النظر عن مقدار الدقة التى نتوخاها فى تحقيقها . ولكن دعنا نسأل أنفسنا : ما هو

معناها الحقيق ؟ كيف يمكننا التأكد من أن ساعتين بعيدتين تعطيان نفس الوقت بالضبط ؟ لعل التليفزيون هو إحدى الطرق التي يمكننا استخدامها لإثبات ذلك . ويجب أن نفهم أن جهاز التليفزيون سيستخدم كمثال فقط وأنه ليس أساسياً لدراستنا . وأستطيع الآن أن أقف على مقربة من إحدى الساعتين وأنظر في نفس الوقت إلى صورة الساعة الأخرى في جهاز التليفزيون وبذلك أستطيع أن أحكم عما إذا كانت الساعتان تعطيان نفس الوقت أم لا . ولكن هذه الطريقة ليست سليمة إذ أن صورة الساعة التي ظهرت في جهاز التليفزيون قد حملتها أمواج كهرمغناطيسية متحركة بسرعة الضوء ، وبذلك تكون تلك الصورة التي رأيناها قد أرسلت قبل لحظة رؤيتها بوقت قليل ، هو الوقت الذي أخذته في الانتقال من مكان الساعة الأصلي إلى جهاز التليفزيون ، في حين أن الساعة الثانية تعطينا الوقت الحالي بالضبط . ويمكننا التغلب على هذه الصعوبة بسهولة إذا أخذنا صوراً بالتليفزيون لكل من الساعتين عند نقطة تبعد عن كل منهما بمسافة متساوية ثم نشاهد قراءتيهما عندئذ . فإذا كانت الإشارتان قد أرسلتا في نفس الوقت فإنهما سيصلان إلى نقطة المشاهدة في نفس اللحظة أيضاً . أي أننا إذا شاهدنا ساعتين دقيقتين من نقطة في منتصف المسافة بينهما فإنهما سيعطيان نفس الزمن دائماً ، وبذلك يصبحان ملائمين لتعيين أزمنة الأحداث التي تقع عند نقطتين بعيدتين .

وقد سبق أن استخدمنا ساعة واحدة في الميكانيكا ولكنها لم تكن جد ملائمة ، إذ أنه كان علينا أن نقوم بكل قياساتنا على مقربة من هذه الساعة الوحيدة وإذا نظرنا إلى ساعة موضوعة على بعد كبير خلال جهاز التلفيزيون مثلا فإنه يجب علينا أن نتذكر دائماً أن ما نراه الآن قد حدث فعلا في وقت مضى ، كما هي الحال عندما نشاهد غروب الشمس ، إذ أن ما نشاهده يكون قد وقع فعلا قبل ثمان دقائق من لحظة المشاهدة . وإذن يجب علينا أن نقوم بتصحيحات لكل تقديراتنا الزمنية بمقادير تتوقف على بعدنا من الساعة .

ويتضح مما سبق أنه من غير المناسب ألا يكون لدينا سوى ساعة واحدة . والآن وقد عرفنا كيف نستطيع الحكم على أن اثنتين أو أكثر من الساعات تعطينا

نفس الزمن ، وتسير بنفس الطريقة ، فإننا يمكننا أن نتصور أن لدينا عدداً كبيراً من الساعات فى إحدى المجموعات الاحداثية . وستمكننا هذه الساعات من تقدير أزمنة وقوع الأحداث التى تقع بقربها ، وسنفرض أن كل هذه الساعات غير متحركة بالنسبة لهذه المجموعة الاحداثية . وبذلك تتوفر لدينا مجموعة من الساعات الدقيقة المضبوطة التى تعطينا نفس قراءة الزمن فى نفس اللحظة .

وليس فيما فعلناه من وضع هذه الساعات فى مجموعتنا الاحداثية ، مايستحق أن يثير دهشتنا إذ أننا الآن نستطيع أن نقرر ما إذا كان حدثان بعيدان قد وقعا فى نفس الوقت أم لابالنسبة لمجموعة إحداثية معينة ، فإذا أعطت الساعتان القريبتان من هذين الحدثين نفس القراءة عند وقوع الحدثين أمكننا أن نجزم بأنهما قدوقعا فى نفس الوقت ، وكذلك أيضاً يصبح فى مقدورنا أن نقول بأن أحد الحدثين قد وقع قبل الآخر . وكل هذا بفضل الساعات المضبوطة المثبتة فى مجموعتنا الإحداثية .

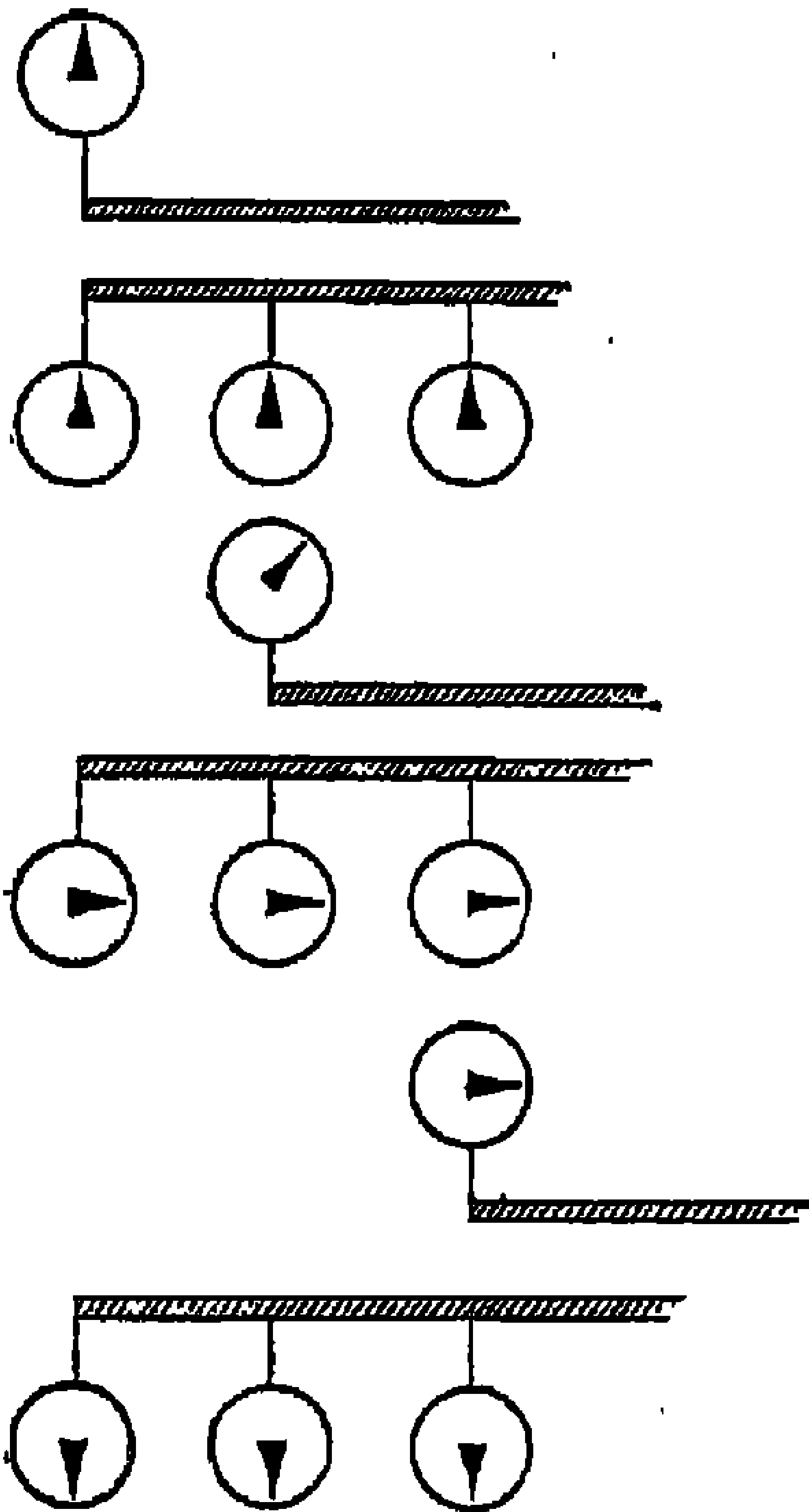
ونحن فيما سبق لم نخرج عن نطاق علم الطبيعة الكلاسيكى وليس فى النظام الذى وضعناه أى تناقض مع التحويلات الكلاسيكية . وقد استخدمنا الإشارات الضوئية لضبط ساعاتنا أثناء تعريفنا للاحداث الآتية . وتلعب سرعة الضوء ـ التى تتحرك بها هذه الإشارات ـ دوراً أساسياً فى النظرية النسبية .

وحيث أننا معنيون بدراسة حركة مجموعتين احداثيتين متحركتين بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضهما ، فيجب علينا أن نعتبر قضيبين مثبت بكل منهما مجموعة من الساعات ، وبذا يتوفر لكل من المشاهدين الموجودين بالمجموعتين المتحركتين قضيب المقياس ، ومجموعة الساعات المثبتة به .

وأثناء دراستنا لعملية القياس فى الميكانيكا الكلاسيكية ، استخدمنا ساعة واحدة لجميع المجموعات الاحداثية ، فى حين أن لدينا الآن ساعات كثيرة فى كل مجموعة إحداثية وليس هذا الفرق بذى أهمية إذ أن ساعة واحدة تكفى ولكننا لانستطيع الاعتراض على استخدام ساعات كثيرة مادامت كلها مضبوطة ومتجانسة وتعطى نفس الوقت للاحداث الآنية .

ونحن الآن نقترب من النقطة الأساسية التى تتعارض فيها قوانين التحويل الـكلاسيكى مع نظرية النسبية . ماذا يحدث عندما تتحرك مجموعة الساعات بانتظام بالنسبة إلى مجموعة أخرى ؟ سوف يجيب عالم الطبيعة الـكلاسيكية بقوله : سوف لا يجد علينا شيء ، فستظل الساعات كما لو كانت ساكنة بالنسبة لبعضها ، وستعطينا نفس الزمن بغض النظر عن حركتها ، وتخبرنا الطبيعة الـكلاسيكية بأنه إذا وجد حدثان آنيان فى مجموعة إحداثية واحدة فإنهما سيظلان كذلك فى أى مجموعة أخرى . ولـكن هذه ليست هى الإجابة الوحيدة ، إذ يمـكننا أن نتخيل للساعة المتحركة توقيتاً يختلف عن توقيت الساعة الساكنة . ولندرس الآن هذا الاحتمال ، دون أن نتخذ لأنفسنا قراراً فيما إذا كانت الحركة تؤثر حقاً فى تقدير الساعة للوقت .

ولنبدأ بشرح ماذا نعنى بقولنا أن حركة الساعة تؤثر فى تقديرها للوقت ؟ ولنفرض للسهولة أن لدينا ساعة واحدة مثبتة فى مجموعة إحداثية عليا وأخريات مثبتة فى المجموعة الاحداثية السفلى وأن لـكل الساعات نفس التركيب الميـكانيكى الداخلى وأنهـا مضبوطة تعطى نفس القراءة للحوادث الآنية عند ثبوت المجموعتين الإحداثيتين بالنسبة لبعضهما. وسيوضح الشكل المرافق ثلاثة أوضاع متتابعـة للمجموعتين الإحـداثيتين المتحركتين بالنسبة لبعضهما .



وقد كان المفروض ضمنياً فى الميكانيكا الـكلاسيكية أن حركة الساعة لا تؤثر أبداً فى نظام تقديرها للوقت . وقد كان هذا مفروضاً كبديهية لا تستحق حتى مجرد الذكر . ولـكن لا يجب

علينا — إذا أردنا الدقة — أن نمضى فى تحليل هذا الافتراض الذى سبق الأخذ به كقضية مسلمة فى علم الطبيعة .

ولا يجب علينا نبذ فرض ما لمجرد أنه يختلف عما ألفناه فى الطبيعة الكلاسيكية فيمكننا مثلا أن نتصور أن ساعة متحركة تغير نظام توقيتها ؛ ما دام القانون الذى يحدد هذا التغير ، ينطبق على جميع المجموعات الإحداثية القاصرة .

لنعتبر الآن مثلا آخر . لنفرض أن لدينا عصا ، يبلغ طولها ياردة واحدة عند ما تكون ساكنة فى مجموعة أحداثية ما . لنفرض أن هذه العصا قد أخذت فى التحرك بانتظام منزلقة على القضيب الذى يمثل المجموعة الإحداثية . فهل سيظل طولها ياردة أيضاً ؟ قبل الإجابة على هذا السؤال يجب علينا أن نعرف كيف يمكننا تعيين طول العصا . عند ما تكون العصا فى حالة سكون سينطبق طرفاها مع علامتين — على قضيب القياس — يحصران بينهما طولا قدره ياردة واحدة فى المجموعة الإحداثية (أى قضيب القياس) ، وبهذه الطريقة استنتجنا أن طول العصا يبلغ ياردة واحدة . ولكن كيف يمكننا الآن قياس طولها أثناء حركتها ؟ يمكننا عمل ذلك بالطريقة التالية : عند لحظة معينة يأخذ مشاهدان صورتين فوتوغرافيتين ، إحداهما لأحد طرفى العصا والأخرى للطرف الآخر ، وحيث أن الصورتين قد أخذتا فى نفس الوقت فإننا يمكننا مقارنة العلامات على قضيب المجموعة الإحداثية الذى ينطبق عليه طرفا العصا ، وبهذه الطريقة نعين طولها . ولا بد من وجود مشاهدين ليلاحظا الأحداث التى تقع فى نفس الوقت فى أجزاء مختلفة من مجموعتنا الإحداثية . وليس هناك ما يحملنا على الاعتقاد بأن نتيجة مثل هذه القياسات ستتفق مع تلك التى وجدناها مثلا فى حالة العصا الساكنة . وبما أن هذه الصور الفوتوغرافية يجب أن تؤخذ فى نفس الوقت ، وهذا — كما نعرف الآن — يتوقف على المجموعة الإحداثية المتبعة ، فإنه يبدو جد محتمل إن نتائج هذه القياسات ستختلف باختلاف المجموعات الإحداثية المتحركة بالنسبة لبعضها .

ويمكننا الآن أن نتصور بسهولة إنه ليس الساعة المتحركة وحدها هى التى تغير توقيتها ، بل إن العصا المتحركة ستغير طولها أيضاً ، ما دامت قوانين

التغـير تتحقق فى جميع المجموعات الإحداثية القاصرة .

وكنا ندرس حتى الآن احتمالات جديدة دون أن نعطى أى مبررات لفرضها .

ولعلنا نذكر أن سرعة الضوء ثابتة فى جميع المجموعات الإحداثية القاصرة وأن من المستحيل التوفيق بين هذه الحقيقة وبين التحويلات الـكلاسيكية . والآن دعنا نتساءل عما إذا كان فى الإمكان أن يؤدى الفرض بالتغـير فى نظام توقيت الساعة المتحركة وفى طول القضيب المتحرك إلى الفرض بثبات سرعة الضوء ؟ إن ذلك ممكن حقاً ! وهذه هى الحالة الأولى التى تختلف فيها النظرية النسبية مع الطبيعة الـكلاسيكية اختلافاً أساسياً . ويمكننا التعبير عن هذه الحقيقة بالطريقة العكسية التالية ! إذا كانت سرعة الضوء ثابتة فى جميع المجموعات الأحداثية فإن القضبان المتحركة تعانى تغيراً فى أطوالها وكذلك يتغير نظام توقيت الساعات المتحركة ، ويمكننا استنتاج القوانين التى تتحكم فى هذه التغيرات .

وليس فى ذلك أى غموض أو عدم تمش مع المنطق . فقد كان المفروض دائماً فى الطبيعة الـكلاسيكية أن نظام التوقيت واحد للساعات المتحركة والساكنة على حد سواء ، وأن للقضبان المتحركة والساكنة نفس الأطوال ! فإذا كانت سرعة الضوء ثابتة فى جميع المجموعات الأحداثية ، أى إذا كانت نظرية النسبية صحيحة فإنه يجب علينا التضحية بهذا الفرض . ونعلم أنه من الصعب التخلص من العقائد والآراء المتأصلة فى النفس ، ولـكن ماذا نفعل وليس أمامنا طريق آخر ؟ ومن وجهة نظر النظرية النسبية تبدو الآراء القديمة اختيارية . فلماذا نعتقد — كما فعلنا سابقاً — فى الزمن المطلق وثبوته بالنسبة لجميـع المشاهدين فى كل المجموعات الإحداثية ؟ ولماذا نعتقد فى ثبوت الأطوال وعدم قابليتها للتغـير ؟ فالزمن يتعين باستخدام الساعات ، والأطوال بالقضبان ، ويمكن أن تتوقف نتائج قياساتها على خواص الساعات والقضبان أثناء حركتها ، وليس هناك ما يبرر الاعتقاد بأن هذه النتائج والعمليات ستسير على النمط الذى نوده ! وقد أرتنا المشاهدات — بطريق غير مباشر — خلال ظواهر المجال الـكهرمغناطيسى أن الساعة المتحركة تغـير معدل توقيتها وأن القضيب يغير طوله ، على حين أننا لم نتوقـع حدوث ذلك على

أساس الظواهر الميكانيكية . ويجب أن نقبل فكرة الزمن النسبي فى كل مجموعة إحداثية لأنها أفضل طريقة للتخلص من متاعبنا . وقد أظهر التقدم العلمى الناتج من نظرية النسبية ، أننا لا يجب أن ننظر إلى هذا التطور الجديد فى المعتقدات كضرورة لا بد منها حيث أن مميزات النظرية الجديدة قد أصبحت ظاهرة للعيان .

وكنا نحاول فيما سبق إيضاح الدوافع التى أدت إلى الفروض الأساسية لنظرية النسبية ، وكيف أن النظرية قد اضطرتنا إلى مراجعة وتغيير التحويلات الكلاسيكية باعتبار الزمن والمكان على أسس جديدة . ولسنا نهدف إلا إلى إيضاح الآراء التى تكون أسس وجهة نظر طبيعية وفلسفية جديدة . وهذه الآراء بسيطة ، ولكنها — على الصورة التى صيغت فيها هنا — لا تكفى لكى نحصل منها على استنتاجات نوعية أو كمية . وهنا يجب علينا أن نستخدم الطريقة القديمة لشرح الآراء الأساسية فقط مكتفين بذكر بعض الآراء الأخرى دون أى برهنة .

ولإيضاح الفرق بين وجهة نظر عالم الطبيعة الكلاسيكية الذى سنرمز إليه بالرمز « ك » وهو الذى يعتقد بصحة قوانين التحويل الكلاسيكى ، وبين وجهة نظر عالم الطبيعة الحديثة الذى سنرمز إليه بالرمز « ح » وهو الذى يعتقد فى نظرية النسبية وسنتصور الحديث التالى بينهما :

ك — أنا أومن بقاعدة جاليليو النسبية لأنى أعلم أن قوانين الميكانيكا تتحقق فى مجموعتين إحداثيتين متحركتين بانتظام بالنسبة لبعضهما أو بعبارة أخرى إن هذه القوانين تعتبر لازمة بالنسبة للتحويل الكلاسيكى .

ح — ولكن نظرية النسبية يجب أن تنطبق على جميع الإحداث فى عالمنا الخارجى ، إذ أن جميع القوانين الطبيعية — وليست فقط قوانين الميكانيكا — يجب أن تتحقق فى جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضها البعض .

ك — ولكن كيف يمكن أن تتحقق جميع القوانين الطبيعية فى جميع الإحداثيات المتحركة بالنسبة لبعضها ؟ فمعادلات المجال — أى معادلات ماكسويل

— ليست لازمة (أى لا تتغير) بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية ، ويظهر هذا بوضوح مع سرعة الضوء ، إذ أن التحويلات الكلاسيكية تنص على أنها يجب ألا تكون ثابتة فى كلا المجموعتين المتحركتين بالنسبة لبعضهما .

ع — إن هذا يثبت أن التحويلات الكلاسيكية لا يمكن استخدامها وأن العلاقة بين المجموعتين الإحداثيتين يجب أن تكون مختلفة ، وأنه يحتمل ألا نربط بين الإحداثيات والسرع بنفس الطريقة المتبعة فى التحويلات الكلاسيكية ، التى يجب أن نستبدلها بأخرى جديدة نستنتج من الفروض الأساسية لنظرية النسبية . ولنفرض أننا لا نهتم الآن بالقيم الرياضية لهذه التحويلات الجديدة وأننا نقنع فقط بكونها مختلفة عن التحويلات الكلاسيكية ، وسنسمى هذه التحويلات الرياضية الجديدة بتحويلات لورنتز . ويمكننا إثبات أن معادلات ماكسويل — أى قوانين المجال — لازمة لا تتغير بالنسبة لتحويلات لورنتز ، تماماً كلزوم قوانين الميكانيكا بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية . ولنذكر كيف كانت هذه التحويلات فى الطبيعة الكلاسيكية ، فقد كانت لدينا قوانين تحويل للاحداثيات والسرع وكانت قوانين الميكانيكا لازمة بالنسبة إلى مجموعتين من الإحداثيات متحركة بانتظام بالنسبة لبعضها . وكانت لدينا تحويلات لأوضاع الأجسام فقط ، دون ذكر للزمن ، حيث إن الزمن كان واحداً فى جميع المجموعات الأحداثية . أما فى النظرية النسبية فالوضع جد مختلف فلدينا قوانين تحويل مختلفة عن القوانين الكلاسيكية وخاصة بالأوضاع والزمن والسرعة . ولكننا نكرر أن قوانين الطبيعة يجب أن تتحقق فى جميع المجموعات الأحداثية المتحركة بانتظام بالنسبة لبعضها أى أن هذه القوانين يجب أن تكون لازمة — لا بالنسبة إلى التحويلات الكلاسيكية — بل بالنسبة لنوع جديد من التحويلات يسمى بتحويلات لورنتز . وتتحقق جميع القوانين الطبيعية فى جميع المجموعات الاحداثية القاصرة ، وتتحول هذه القوانين من مجموعة إلى أخرى بواسطة تحويلات لورنتز .

ب — أوافقك على ذلك ولكن يهمنى أن أدرك الفرق بين التحويلات الكلاسيكية وتحويلات لورنتز .

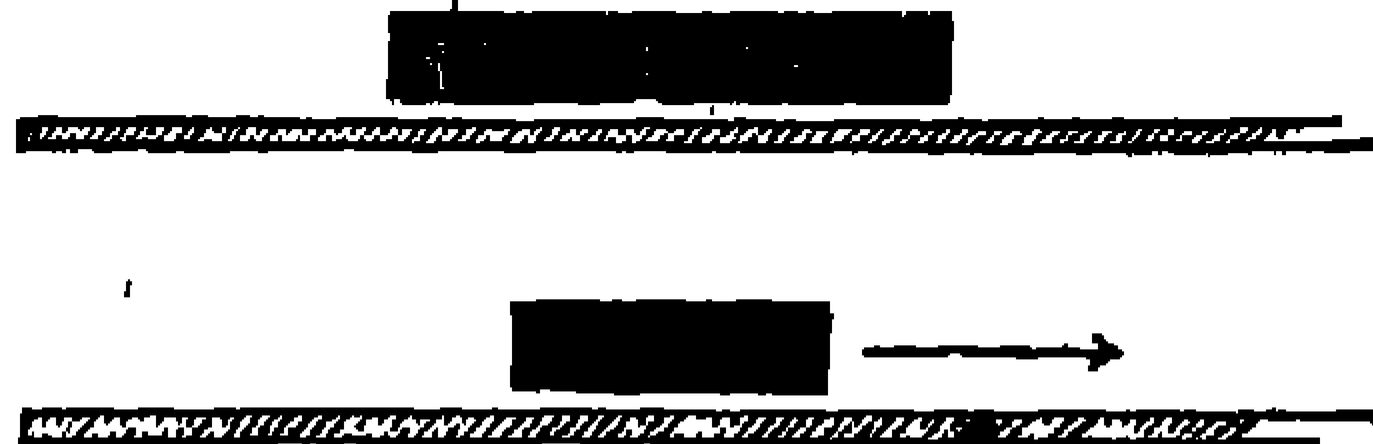
ع — أفضل طريقة للاجابة على سؤالك هى الآتية : أذكر لى أولا بعضاً من الخواص المميزة للتحويلات الكلاسيكية وسأحاول أن أبين لك ما إذا كانت هذه ستظل صحيحة فى حالة تحويلات لورنتز أم لا ، وفى الحالة الأخيرة سأشرح لك كيف تغيرت .

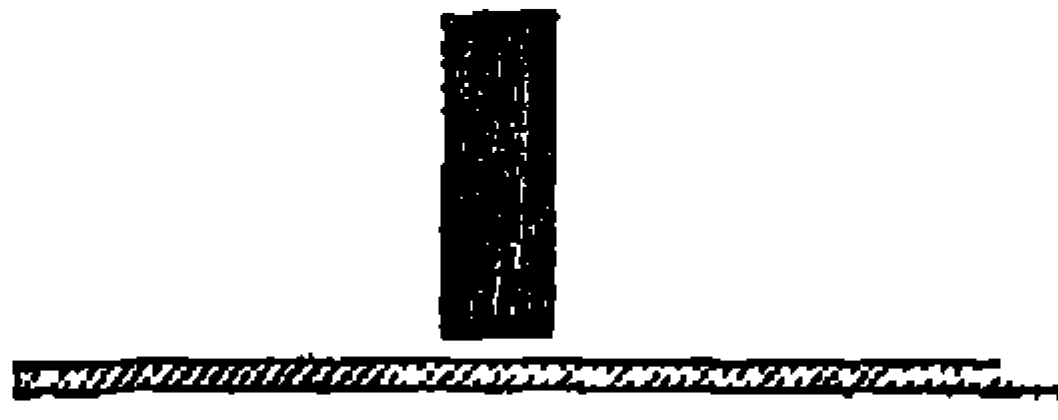
ں — إذا وقع حدث معين عند لحظة معلومة فى مجموعتى الإحداثية فإنه ينتج أن المشاهد فى مجموعة إحداثية أخرى متحركة بانتظام بالنسبة لمجموعتى سيحدد رقماً مختلفاً للمكان الذى يقع فيه الحدث ولكن فى نفس الوقت بالطبع ، إذ أننا نستخدم نفس الساعة فى جميع مجموعاتنا الإحداثية ولا يهمنا ما إذا كانت الساعة متحركة — منتقلة — أم لا . فهل هذا صحيح بالنسبة إليك ؟

ع — كلا — هذا ليس بصحيح ، فكل مجموعة إحداثية يجب أن تزود بساعاتها غير المتحركة ، حيث أن الحركة تغير نظام التوقيت . فشاهدان مثلا فى مجموعتين إحداثيتين مختلفتين سيحددان أرقاماً مختلفة لمكان حدث ما وكذلك رقمين مختلفين للزمن الذى يقع فيه ذلك الحدث .

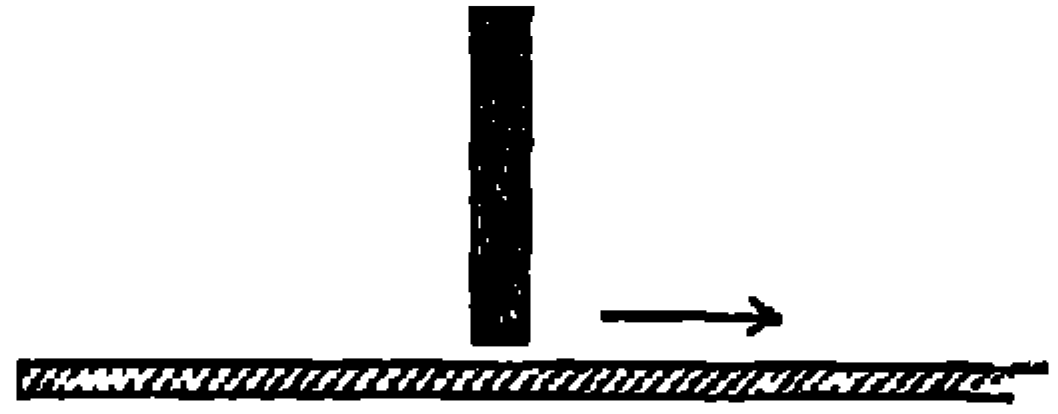
ں — هذا يعنى أن الزمن ليس لازماً . ففى التحويلات الكلاسيكية كان الزمن واحداً فى جميع المجموعات الاحداثية ، أما فى تحويلات لورنتز فإنه يتغير ويسلك مسلك الإحداث فى التحويلات القديمة . ولا أدرى ماذا يحدث للمسافة ؟ ففى الميكانيكا الكلاسيكية يحتفظ قضيب مادى متماسك بطوله فى حالتى الحركة والسكون . فهل هذا صحيح الآن أيضاً ؟

ع — كلا — ليس بصحيح . وفى الحقيقة أنه ينتج من تحويلات لورنتز أن العصا المتحركة تتقلص فى اتجاه الحركة ، ويزداد التقلص بازدياد السرعة . فكلما تحركت العصا بسرعة كلما ظهرت أكثر قصراً . ولكن هذا يحدث فقط فى اتجاه الحركة . فأنت ترى فى الرسم قضيباً متحركا يتقلص إلى نصف طوله عندما يتحرك





بسرعة تقترب من ٩٠ ./ من سرعة الضوء . هـذا فى حين أنه ليس هناك تقلص فى الاتجاه العمودى على الحركة كما حاولت أن أبين فى الرسم .



ن — هـذا يعنى أن تقدير ساعة متحركة للوقت وكذلك طول عصا متحركة يتوقفان على السرعة ، فكيف يمكن ذلك ؟

ع — يكون هـذا التغير واضحاً عندما تزداد السرعة وينتج من تحويلات لورنتز أن العصا تتقلص وينعدم طولها إذا بلغت سرعتها سرعة الضوء . وبالمثل فإن تقدير ساعة متحركة للزمن يقـل إذا قورنت بالساعات التى تمر عليها والمثبتة بالقضيب ، وتقف نهائياً عن الدوران إذا تحركت بسرعة الضوء .

ن — يبدو لى أن هـذا يتعارض مع التجربة ، فنحن نعلم أن السيارة لا تتقلص عندما تتحرك ونعلم أيضاً أن السائق يمكن أن يقارن ساعته بالساعات التى يمر بها . وقد وجدت أنها كلها تتفق مع بعضها خلافا لما ذكرته لى !

ع — ما قلته صحيح لاريب فيه . ولـكنك تلاحظ أن هذه السرع الميكانيكية صغيرة جداً بالنسبة لسرعة الضوء ، وبذا يصبح من التفاهة تطبيق نظرية النسبية على هذه الظواهر . ويمكن لـكل سائق أن يستخدم الطبيعة الـكلاسيكية باطمئنان حتى ولو ضاعف سرعته مائة ألف مرة . ويمكننا أن نتوقع الاختلاف بين التجربة وبين التحويلات الـكلاسيكية فقط عند ما تقترب السرعة من سرعة الضوء . ففى حالة السرع الـكبيرة جداً يمكننا اختبار صحة تحويلات لورنتز .

ن — ولـكن مع ذلك هناك صعوبة أخرى ، فتبعاً لقواعد الميكانيكا يمكننى تصور أجسام متحركة بسرع أكبر من سرعة الضوء . فالجسم الذى يتحرك بسرعة الضوء بالنسبة لسفينة متحركة . ستكون سرعته أكبر من سرعة الضوء بالنسبة إلى الشاطىء . فماذا يحدث إذن للعصا التى تقلصت إلى لا شىء عند ما

تحركت بسرعة الضوء ؟ فمن الصعب تصور طولاً سالباً ، إذا ازدادت سرعة العصا عن سرعة الضوء .

ع — ليس هناك مايدعو إلى مثل هذه السخرية ! فعلى أساس نظرية النسبية لا يمكن أن تزيد سرعة الجسم عن سرعة الضوء . فسرعة الضوء هى الحد الأقصى لسرع جميع الأجسام المادية . فإذا كانت سرعة جسم بالنسبة للسفينة هى سرعة الضوء فإنها ستكون لهـا نفس القيمة بالنسبة للشاطئ . فقانون الجمع والطرح الميكانيكى البسيط لا يتحقق هنا أو على الأصح ينطبق بالتقريب على حالة السرع البسيطة ، ولـكن ليس على السرع التى تقترب من سرعة الضوء . وتظهر القيمة العددية لسرعة الضوء بوضوح فى تحويلات لورنتز ، وتلعب دور حالة نهائية ، كالدور الذى تحتله السرعة اللانهائية فى الميكانيكا الـكلاسيكية . ولا تتعارض هذه النظرية العامة مع التحويلات الـكلاسيكية والميكانيكا الـكلاسيكية بل أنها على العكس تتفق مع المعتقدات الـكلاسيكية فى الحالة النهائية عندما تـكون السرع ذات قيم صغيرة . ويتضح لنا من وجهة نظر النظرية الجديدة ، متى تتحقق النظرية الـكلاسيكية وأين يتضح قصورها . وإذن يكون تطبيق نظرية النسبية على حركة السيارات والقطارات مما يدعو حقاً إلى السخرية . تماما كاستعمال الآلة الحاسبة فى عمليات ضرب بسيطة موجودة فى جدول الضرب .

نظرية النسبية والميكانيكا :

إن الضرورة هى التى أدت إلى نشوء نظرية النسبية ، فضلا عن التناقض الواضح الـكامن فى النظرية القديمة والذى لم نستطع التخلص منه بكل الطرق الممكنة . وتعزى قوة النظرية الجديدة إلى البساطة والدقة التى حلت بهما هذه المشا كل مع استخدام فروض منطقية قليلة . فعلى الرغم من أن النظرية نشأت من مشكلة المجال فإن عليها أن تشمل أيضاً جميع القوانين الطبيعية . وهنا تبدو لنا مشكلة جديدة ، فللقوانين المجال من ناحية وللقوانين الميكانيكية من ناحية أخرى طبيعتان مختلفتان ، فمعادلات المجال الـكهرمغناطيسى لاتتغير بالنسبة إلى تحويلات لورنتز

فى حين أن المعادلات الميكانيكية لاتتغير بالنسبة إلى التحويلات الكلاسيكية . ولكن النظرية النسبية تدعى أن قوانين الطبيعة يجب أن تكون لازمة بالنسبة لتحويلات لورنتز وليست بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية . وليست هذه الأخيرة سوى حالة خاصة من تحويلات لورنتز عندما تكون السرع النسبية للمجموعتين الاحداثيتين صغيرة جداً . فإذا كانت الحال كذلك فإن الميكانيكا الكلاسيكية يجب أن تتغير حتى تلائم شروط عدم التغير بالنسبة لتحويلات لورنتز . أو بعبارة أخرى أن الميكانيكا الكلاسيكية لايمكن أن تظل حقيقية إذا اقتربت سرعة التحرك من سرعة الضوء . أى أنه لن تكون هناك سوى تحويلات واحدة من مجموعة احداثية إلى أخرى . هى تحويلات لورنتز .

وقد كان من السهل تغيير الميكانيكا الكلاسيكية بطريقة لاتتعارض مع النظرية النسبية من ناحية ، ولامع مجموعة الحقائق التى حصلنا عليها بالتجربة ، وشرحت على أساس الميكانيكا الكلاسيكية . فالميكانيكا القديمة تتحقق فى حالة السرع الصغيرة وبذلك تكون هى الصورة النهائية للميكانيكا الجديدة .

ولعله من المفيد أن نذكر مثلا للتغير فى الميكانيكا الكلاسيكية الحادث بسبب النظرية النسبية ، ونحاول الحصول على بعض استنتاجات منها ، ثم نبحث فيما إذا كانت التجارب العملية تؤيد هذه الاستنتاجات أو تنكرها .

لنفرض أن لدينا جسما ذا كتلة معينة يتحرك على خط مستقيم وتؤثر عليه قوة خارجية فى اتجاه الحركة . فكما نعلم ستتناسب القوة المؤثرة عليه مع معدل التغير فى السرعة وإذن لايعنينا ماإذا ازدادت سرعة الجسم فى الثانية من ١٠٠ إلى ١٠١ قدما فى الثانية أو من ١٠٠ ميل إلى ١٠٠ ميل وقدم واحد فى الثانية أو من ١٨٠٠٠٠ ميل إلى ١٨٠٠٠٠ وقدم واحد فى الثانية . فالقوة التى تؤثر على جسم معين لا تتوقف إلا على معدل التغير فى السرعة فقط .

فهل تتحقق هذه الظاهرة أيضاً فى النظرية النسبية ؟ كلا ..؟ فهذا القانون لاينطبق إلا على حالات السرع الصغيرة فقط . ولكن ماهو القانون الذى وضعته نظرية النسبية فى حالة السرع الكبيرة التى تقترب من سرعة الضوء ؟ . إذا كانت

السرعة كبيرة فلابد من وجود قوة كبيرة لزيادة مقدارها . فليست القوة التي تسبب زيادة قدم في الثانية للسرعة ١٠٠ قدم في الثانية هي نفسها التي تسبب نفس الزيادة في سرعة تقترب من سرعة الضوء . فكلما اقتربت السرعة من سرعة الضوء كلما أصبح من الصعب زيادة قدرها . وعندما تتساوى سرعة الجسم مع سرعة الضوء يصبح من المستحيل زيادتها عن ذلك . وإذن فالتغيرات التي أحدثتها نظرية النسبية ليست من الغرابة في شيء ؛ فسرعة الضوء هي كما قلنا الحد الأقصى لجميع السرع ، وليست هناك أي قوة معينة — مهما زاد قدرها — يمكن أن تسبب أي ازدياد في السرعة عن هذا القدر . وهكذا ، بدلا من القانون الميكانيكي القديم الذي يربط القوة بالتغير في السرعة نحصل على قانون أكثر تعقيداً . ويخيل إلينا — من جهة نظرنا الخاصة — أن الميكانيكا الكلاسيكية بسيطة لأننا في جميع ملاحظاتنا وتطبيقاتنا نستخدم سرعاً أقل بكثير من سرعة الضوء .

ويتميز الجسم الساكن بكتلة معينة تسمى بالكتلة الساكنة . وتفيدنا الميكانيكا بأن كل جسم يقاوم التغير في حركته ، فكلما زادت الكتلة ازدادت معها المقاومة وكلما قلت الكتلة قلت معها المقاومة . ولكن الوضع جد مختلف في النظرية النسبية فالجسم لا تزداد مقاومته للتغير كلما ازدادت كتلته فقط بل كلما ازدادت سرعته أيضاً ، فالأجسام ذات السرع المقتربة من سرعة الضوء تبذل مقاومة كبيرة جداً في وجه القوى الخارجية . وقد كانت مقاومة جسم معين للتغير في الميكانيا الكلاسيكية شيئاً ثابتاً يتوقف على الكتلة وحدها ، أما في نظرية النسبية فهي تتوقف على كل من الكتلة والسرعة . وتبلغ القوة حداً لانهائياً من الكبر إذا اقتربت سرعة الجسم من سرعة الضوء .

ولدينا في الطبيعة قذائف تتحرك بمثل هذه السرع ، فذرات المواد الاشعاعية كالراديوم مثلا ، تمثل دور المدفعية التي تقوم بارسال قذائف بسرع متناهية في الكبر . سنذكر الآن باختصار أحد الآراء الحديثة في علمي الطبيعة والكيمياء : تتكون جميع المواد الموجودة في الكون من بضعة أنواع من الجسيمات الأولية . وهذا يشبه إلى حد كبير ما نعرفه من أن جميع المباني في مدينة ما — بما فيها من أكواخ

وناطحات سحاب ذات حجوم مختلفة وأشكال متباينة ـ مكونة من أنواع قليلة مختلفة من اللبنات . وإذن تتكون جميع عناصر عالمنا المادى ـ التى تتراوح بين الايدروجين وهو أخفها وزنا واليورانيوم وهو أثقلها ـ من نفس النوع من اللبنات أى نفس الأنواع من الجسيمات الأولية . وأثقل هذه العناصر وزنا ـ أى تلك المعقدة التركيب ـ ليست مستقرة بل دائما فى حالة تفكك وهو ما نعبر عنه بقولنا أن لها نشاطا إشعاعيا . وبعض هذه اللبنات أو الجسيمات الأولية التى تبنى منها هذه الذرات ذات النشاط الاشعاعى ، تنقذف أحيانا خارج الذرات بسرع كبيرة جدا تقترب من سرعة الضوء . والرأى السائد الآن المدعم بالتجارب هو أن ذرة عنصر مشع كالراديوم مثلا تتميز بتركيب معقد ، وأن التفكك الناتج من النشاط الاشعاعى هو أحد الظواهر التى تتضح فيها حقيقة تركيب الذرات من لبنات أكثر بساطة ، أى من الجسيمات الأولية .

ويمكننا دراسة كيفية مقاومة هذه الجسيمات المنبعثة بسرع كبيرة لتأثير القوة الخارجية بواسطة تجارب دقيقة ومعقدة . وقد أظهرت التجارب أن المقاومة الناتجة من هذه الجسيمات تتوقف على سرعتها بالطريقة التى تنبأت بها نظرية النسبية . وفى حالات كثيرة مختلفة ، عندما أمكن تعيين مدى توقف المقاومة على السرعة وجدنا اتفاقا تاما بين النظرية والتجربة . وهانحن الآن نرى مرة أخرى الظواهر الأساسية للاعمال المنتجة فى العلم أى : التنبؤ نظريا ببعض حقائق ثم تحقيقها بالتجربة .

وتؤدى هذه النتيجة إلى تعميم ذى أهمية كبيرة . فللجسم الساكن كتلة معينة ولكن ليست له طاقة حركة ، أى طاقة ناتجة عن حركته . أما الجسم المتحرك فله كتلة وطاقة حركة ولذا فهو يقاوم التغير فى السرعة بقوة أكثر من الجسم الساكن ، ومن ذلك يظهر لنا أن طاقة حركة جسم متحرك تزيد فى مقاومته فإذا كان لدينا جسمان متساويان فى الكتلة وكان لأحدهما طاقة حركة أكبر من الآخر فإنه يقاوم فعل القوة الخارجية بقوة أكبر .

لنتخيل الآن صندوقاً ساكناً به عدد من الكرات الساكنة أيضاً بالنسبة لمجموعتنا الإحداثية . إذا أردنا تحريك الصندوق وما به ، أو بعبارة أخرى زيادة

سرعتها ، فسنحتاج إلى قوة معينة لإحداث ذلك . ولكن هل يمكن لنفس تلك القوة أن تزيد السرعة بنفس القدر فى نفس الزمن إذا كانت الكرات متحركة فى جميع الاتجاهات داخل الصندوق ـ كما تفعل جزيئات غاز ما ـ بسرعة تقترب من سرعة الضوء ؟ لا بد من وجود قوة أكبر قدراً فى هذه الحالة بسبب ازدياد طاقة حركة الكرات التى تزيد بدورها فى قوة مقاومة الصندوق . فطاقة الحركة تقاوم التحرك تماما كما تفعل الكتلة . هل هذا صحيح أيضاً بالنسبه لأنواع الطاقة الأخرى ؟

تعطينا الفروض الأساسية لنظرية النسبية إجابة واضحة حاسمة ذات طابع كمى وهى : تقاوم جميع الأنواع المختلفة للطاقة التغير فى الحركة ؛ وتتميز الطاقة بخواص مماثلة تماماً لخواص المادة ؛ فكتلة من الحديد تزداد وزنها إذا ما أحميت لدرجة الاحمرار ، وكذلك تحمل الإشعاعات المنبعثة من الشمس ، والتى تعبر الفضاء ، طاقة كبيرة وبالتالى كتلة كذلك ، وإذن ينتج أن كتلة الشمس وجميع الكواكب تقل باستمرار . وتعتبر هذه النتيجة ذات الطابع العام نصراً كبيراً لنظرية النسبية ، وتتفق مع النتائج العملية الأخرى التى تؤيد النظرية النسبية .

وقد عرفت الطبيعة الكلاسيكية شيئين متميزين : المادة والطاقة ، فالمادة لها وزن والطاقة لا وزن لها . وقد ساقت لنا الطبيعة الكلاسيكية أيضاً قانونى بقاء ، أحدهما للمادة والآخر للطاقة . وقد سبق أن تساءلنا عما إذا كانت الطبيعة الحديثة ماتزال تعتقد فى الوجود المنفصل لهذين الشيئين ولقانونى بقائهما . والجواب بالسلب ، إذ أن النظرية النسبية تنص على عدم التفرقة بين الكتلة والطاقة ، فللطاقة كتلة وللكتلة طاقة . وسيصبح لدينا بدلاً من قانونى البقاء ، قانون واحد لبقاء الكتلة (المادة) والطاقة معاً على حد سواء . وقد نجحت وجهة النظر هذه نجاحاً كبيراً وكان لها أثر كبير فى تطور علم الطبيعة . .

ولكن كيف ظلت حقيقة وجود كتلة للطاقة وطاقة للكتلة مختفية زمناً طويلاً ! ؟ وهل تزداد كتلة قطعة من الحديد فعلاً بعد إحمائها ؟ الإجابة على هذا

السؤال هي الآن بالإيجاب ، وقد كانت بالسلب (صفحة ٣٠) . ونستطيع التأكيد بأن عدد الصفحات بين هاتين الإجابتين لا تكفي لشرح هذا التناقض .

والموضوع الذي نحن بصدده الآن هو من النوع الذي رأيناه قبلاً . فتغير الكتلة الناتج من النظرية النسبية صغير لا يمكن قياسه بطريقة الوزن المباشر ولو باستخدام أدق الموازين . ويمكننا أن نثبت بطرق حاسمة ولكنها غير مباشرة على أن الطاقة لها وزن مثل المادة تماماً .

ويرجع سبب عدم ظهور هذه الحقائق واضحة للعيان في أول الأمر إلى ضآلة معدل التحويل بين المادة والطاقة . فيمكننا تشبيه نسبة الطاقة إلى الكتلة بنسبة عملة بخسة القيمة إلى عملة ذات سعر مرتفع . ويوضح لنا المثال التالي ذلك : كمية الحرارة اللازمة لتحويل ثلاثين ألف طن من الماء إلى بخار تزن حوالي جرام واحد ! ! ! ولهذا السبب ظل الاعتقاد « بأن الطاقة لا وزن لها » زمناً طويلاً ، لضآلة قدر كتلتها .

وبذلك يكون الوجود المستقل لكل من الطاقة والمادة ضحية ثانية لنظرية النسبية ، وقد كانت الأولى هي الوسط الذي تنتشر فيه أمواج الضوء .

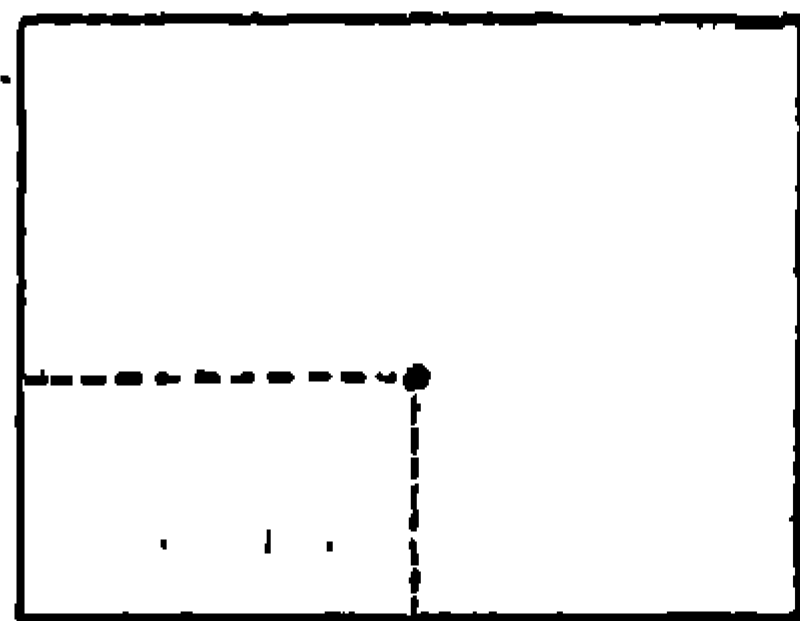
وقد تعدى تأثير النظرية النسبية المشكلة التي كانت سبباً مباشراً لظهورها . فهي تزيل مشاكل ومتناقضات نظرية المجال ، وتضع قوانين ميكانيكية أكثر تعميماً ، وتدمج قانونين مختلفين للبقاء في قانون واحد ثم تغير بعد ذلك فكرتنا الكلاسيكية عن الزمن . وليس تأثير النظرية النسبية محصوراً في ناحية واحدة من علم الطبيعة بل إنه يشمل جميع الظواهر الطبيعية .

متصل الزمان والمكان :

« بدأت الثورة الفرنسية في باريس في اليوم الرابع عشر من يوليو سنة ١٧٨٩ » في هذه العبارة ذكرنا مكان وزمن وقوع حدث معين . فإذا سمع هذه العبارة شخص لأول مرة وكان لا يعرف ما هي باريس ؛ فإنه يمكننا إخباره أن باريس هي

مدينة على سطح الأرض تقع على خط طول ٢° شرقاً وخط عرض ٤٩° شمالا . أى أن هذين الرقين يميزان المكان ، فى حين أن « الرابع عشر من يوليوسنة ١٧٨٩ » يحدد الزمن الذى وقعت فيه الحادثة . ويهمنا فى علم الطبيعة تحديد مكان وزمن حدث ما على وجه الدقة ، أكثر من أهميتهما فى التاريخ ، لأن هذه الأرقام المحددة أساس للوصف الكمى .

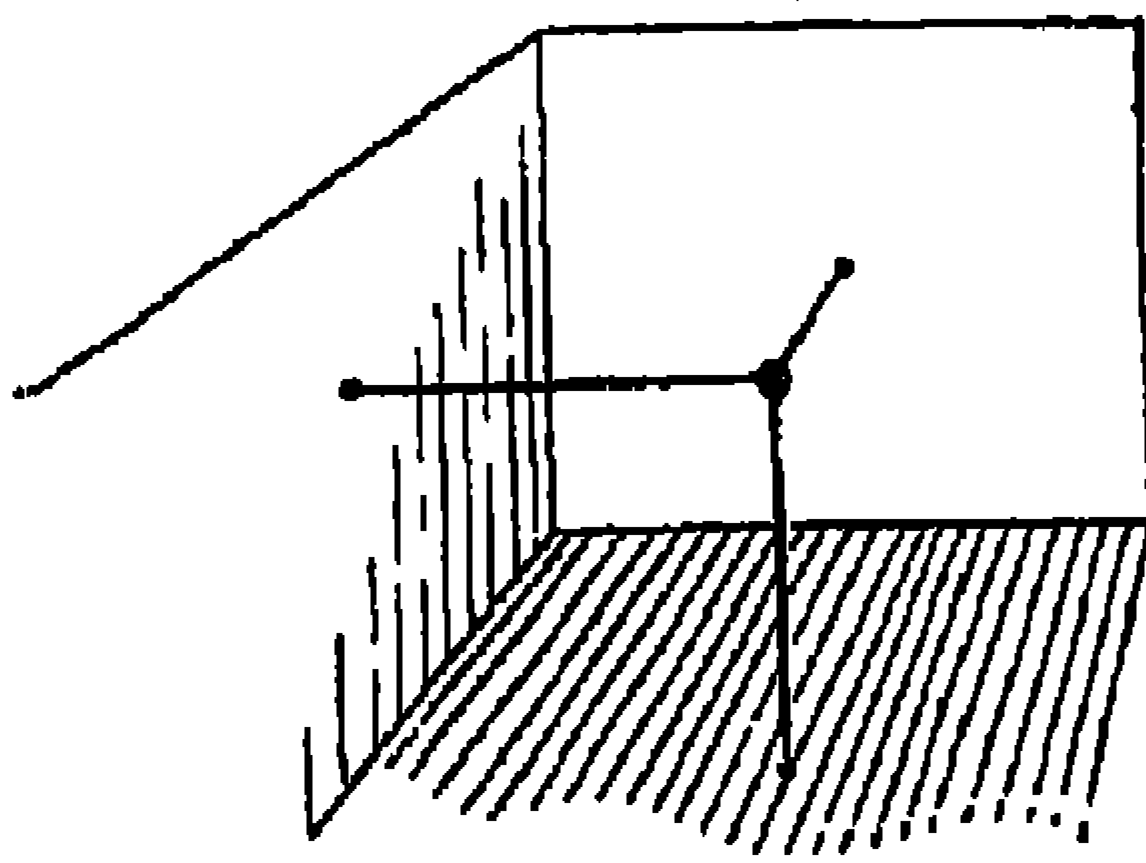
وقد درسنا فيما مضى — بقصد السهولة — الحركة فى خط مستقيم ، فكانت مجموعتنا الاحداثية قضيبا متماسكا له نقطة أصل وليست له نهاية . فلنتذكر هذا جيداً ولنعتبر نقطا مختلفة على القضيب ، يمكن تعيين أماكنها بأرقام وحيدة هى أحداثيات تلك النقط . فإذا قلنا أن أحداثى نقطة ما هو ٧,٥٨٦ قدماً فإننا نقصد أن بعدها عن مركز القضيب هو ٧,٥٨٦ قدماً . وعلى العكس إذا أعطانى شخص ما أى عدد ، ووحدة معينة فإنه يمكننى دائماً إيجاد نقطة على القضيب تناسب هذا الرقم . ويمكننا أن نقول إن كل نقطة معينة على القضيب تشير إلى رقم خاص ، وأن أى عدد معين يشير إلى نقطة خاصة على القضيب . ويعبر الرياضيون عن هذه الحقيقة بالعبارة التالية : تُكوّن جميع نقط القضيب متصلاً ذا بعد واحد . ويوجد بقرب كل نقطة معينة نقطاً أخرى اختيارية . ويمكننا أن نصل نقطة على القضيب بأخرى عليه بواسطة خطوات يمكننا تصغيرها كما نهوى . وهذه الحرية فى اختيار صغر الخطوات التى تصل بين نقطتين بعيدتين تميز المتصل الذى ندرسه .



لنعتبر الآن مثلاً آخر : لنفرض أن لدينا مستوى معيناً أو سطح مائدة مستطيلة ، إذا فضلنا الأمثلة المادية . يمكننا تعيين موضع نقطة ما على هذه المائدة بواسطة رقين لارقم واحد ، كما كانت الحال فى المثال السابق ، وهذان الرقمان هما بعدا هذه النقطة عن حافتين متعامدتين من سطح المائدة . وإذن رقمان — لارقم واحد — هما اللذان يحددان مكان نقطة ما على المستوى ، وكذلك تشير كل نقطة من نقط المائدة إلى رقين عددين . أو بعبارة أخرى المستوى هو متصل ذو بعدين . ويمكن

لنقطتين بعيدتين فى هذا المستوى أن ترتبطا بمنحن يمكن تقسيمه إلى خطوات نصغرها كيفما نشاء . وإذن يكون التحكم فى صغر الخطوات التى تصل بين النقطتين البعيدتين ، التى يمثل كل منهما رقمان ، من مميزات المتصل ذى البعدين .

ولنعتبر مثلا آخر : لنفرض أننا أردنا الآن اختيار حجرة ما كمجموعة أحداثياتنا ، أى أننا نريد أن نصف الأمكنة بالنسبة لجدران الحجرة الصلبة . فوضع نهاية المصباح الكهربائى مثلاً — إذا كان ساكناً — يمكن وصفه بثلاثة أرقام معينة : يعين اثنان منهما البعدين عن جدارين متعامدين بينما يحدد الثالث البعد عن الأرض أو السقف . وإذن تحدد ثلاثة أرقام معينة كل نقطة من نقط الفراغ ، وكذلك تتميز كل نقطة من نقط الفراغ بثلاثة أرقام محددة لها . ونعبر عن هذا بقولنا إن فضاءنا هو متصل ذو ثلاثة أبعاد . وبالمثل يكون التحكم فى صغر الخطوات التى يمكننا بواسطتها الربط بين نقطتين بعيدتين فى الفراغ — كل منهما محددة بثلاثة أرقام — من مميزات المتصل ذى الثلاثة الأبعاد .



ولكن هذا كله ليس من علم الطبيعة فى شىء . ولكى نعود إلى دراستنا الطبيعية يجب أن نعتبر حركة الجسيمات المادية . ولكى ندرس ونتنبأ بوقوع أحداث فى الطبيعة يجب أن نعتبر أزمنة هذه الأحداث فضلا عن أمكنة وقوعها . وسنسوق الآن إلى القارىء مثلا آخر غاية فى البساطة :

هب أن حجراً صغيراً (لدرجة تمكننا من اعتباره كجسيم) ألقى من قمة برج ارتفاعه ٢٥٦ قدماً . فمنذ عصر جاليليو أصبح فى إمكاننا أن نعين عند أى لحظة ما إحداثى (أى بعد) الحجر بعد إسقاطه من قمة البرج . وهاك جدولا يبين أوضاع الحجر بعد ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ثوان على التوالى :

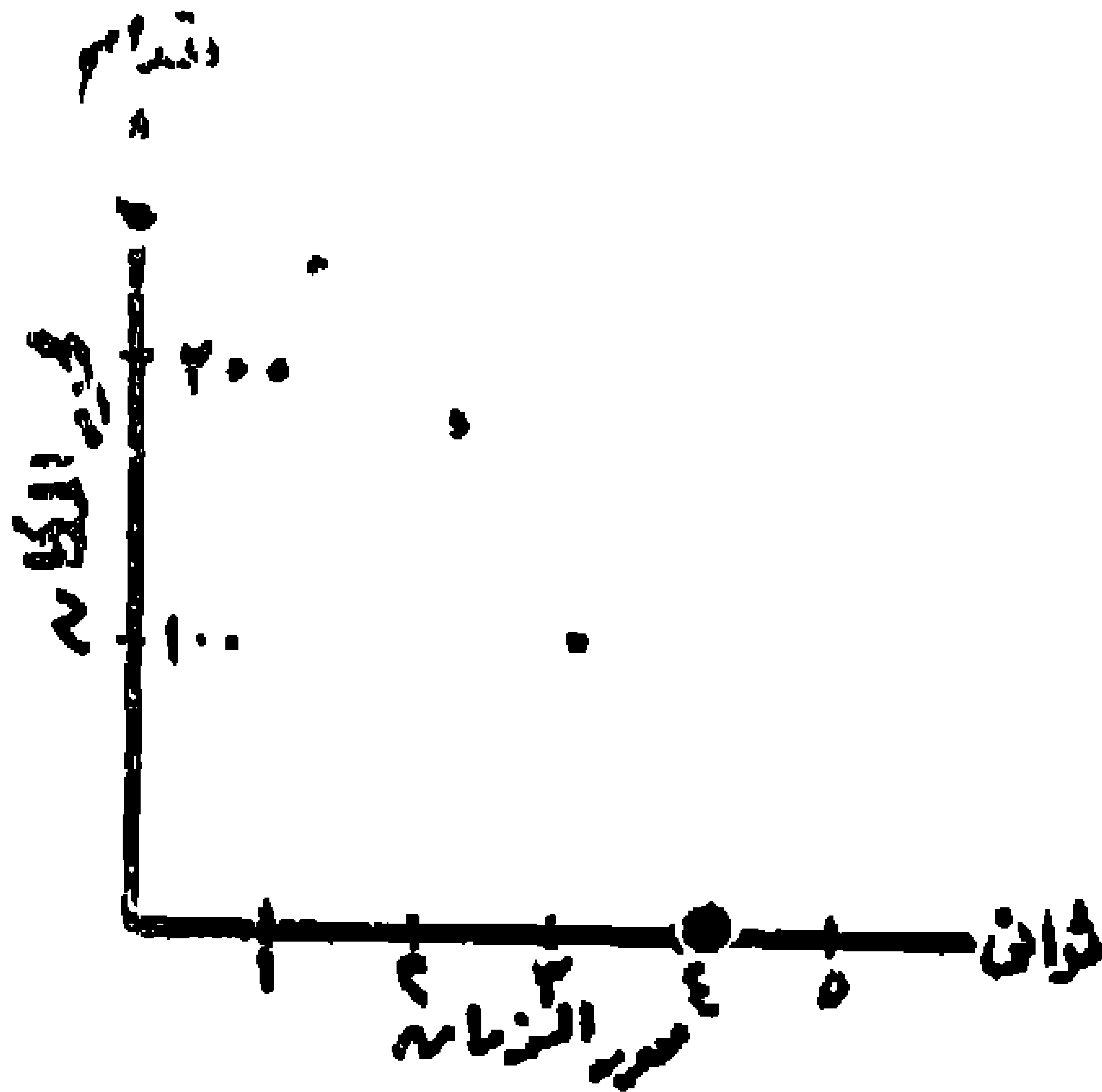
الزمن مقدراً بالثوانى	الارتفاع عن سطح الأرض مقدراً بالأقدام
صفر	٢٥٦
١	٢٤٠
٢	١٩٢
٣	١١٢
٤	صفر

نرى فى هذا الجدول خمسة أحداث ، يتحدد كل منها بواسطة رقمين ، أى الإحداثيين الزمنى والمكانى لكل حدث . فالحدث الأول هو إسقاط الحجر من ارتفاع ٢٥٦ قدماً فوق سطح الأرض عند الزمن « صفر » ثانية . والحدث الثانى هو انطباق الحجر مع مقياسنا المماسك (البرج) عند ارتفاع ٢٤٠ قدماً فوق سطح الأرض . وقد حدث ذلك بعد الثانية الأولى . والحدث الأخير هو انطباق الحجر على سطح الأرض .

ويمكننا تمثيل المعلومات المذكورة فى هذا الجدول الزمنى بطريقة أخرى ؛ فتمثل الأزواج الخمسة من الأرقام ، المذكورة فى الجدول ، بخمس نقط على سطح . ولنتفق أولا على مقاييس لاتباعها فى تمثيل المسافة والزمن ، ولنفرض أننا سنتبع المقياس التالى :

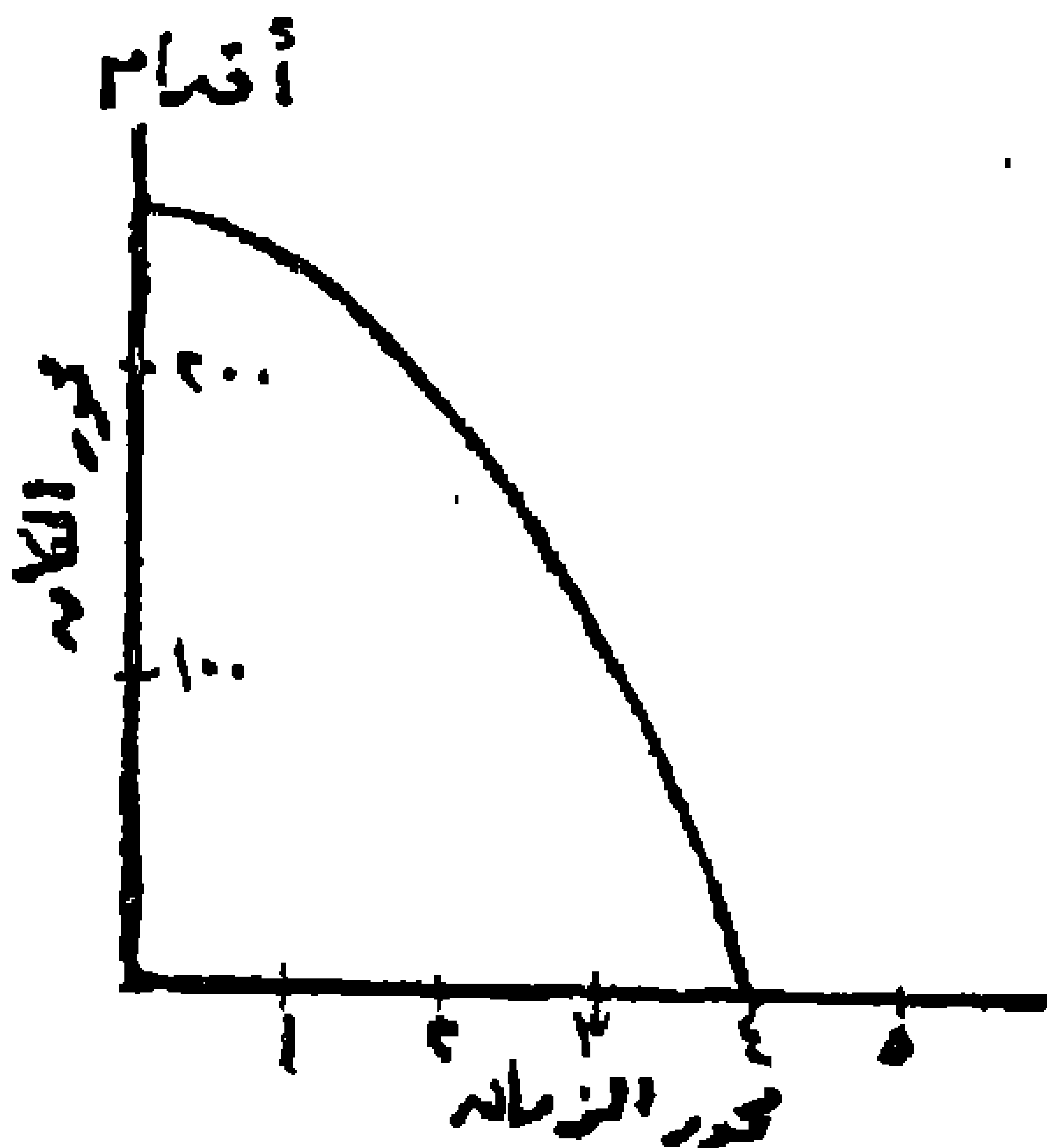
١٠٠ قدم　　　　١ ثانية

سنرسم بعد ذلك خطين متعامدين ، ونسمى الخط الأفقى بمحور الزمن مثلا ، والخط الرأسى بمحور المكان . سنرى على الفور أننا يمكننا تمثيل جدولنا الزمنى المكانى بخمس نقط فى المستوى الذى اتبعناه لتمثيل الزمان والمكان .



وسنمثل أبعاد النقط عن محور المكان الإحداثيات الزمنية كما هي مسجلة في العمود الأول لجدولنا الزمني ، وكذلك تمثل الأبعاد عن المحور الزمني الإحداثيات المكانية . وبذلك نكون قد عبرنا عن نفس الشيء بالضبط بواسطة طريقتين مختلفتين تماماً : الجدول الزمني ؛ ونقط المستوى ، ويمكننا استنتاج كل من هاتين الطريقتين من الأخرى . ومسألة المفاضلة بين طريقتي التمثيل هي مسألة ذوق لا أكثر ، حيث أنهما متكافئتان تماماً .

لنخطو الآن خطوة أبعد من ذلك ونتصور جدولا زمنياً أدق من الجدول السابق يعطينا أوضاع الحجر الساقط ، لا لكل ثانية فقط بل لكل $\frac{١}{١٠٠}$ أو $\frac{١}{١٠٠٠}$ من الثانية ، وبهذا سيكون لدينا عدد كبير جداً من النقط في مستوانا الزماني ـ المكاني . وإذا عرفنا الأوضاع في كل لحظة أو إذا كانت الإحداثيات المكانية معلومة بدلالة الزمن كما يقول الرياضيون فإن مجموعة النقط التي لدينا تكون خطاً متصلا.



وبذلك يكون الرسم التالي ممثلا للمعلومات الكاملة عن الحركة وليس لجزء فقط من هذه المعلومات.

وتمثل هنا الحركة على امتداد القضيب الصلب (البرج) ـ أي الحركة في فضاء ذي بعد واحد ـ بمنحن في متصل زمان ومكان ذي بعدين اثنين. ولكل نقطة من متصلنا الزماني والمكاني عددان

مميزان ، يرمز أحدهما لإحداثى الزمان والاخر لإحداثى المكان وبالعكس تشير أى نقطة فى مستوى الزمان والمكان إلى عددين يحددان حدثاً ما . وتمثل نقطتان متجاورتان حدثين عند مكانين وزمانين مختلفين قليلا عن بعضهما .

ولعلك تعترض على طريقة التمثيل هذه بقولك أنه لا معنى لتمثيل وحدة الزمن بخط صغير فى الرسم البيانى ، ثم الربط بين الزمن والمكان فى شكل متصل ذى بعدين من المتصلين الأحاديا البعد . ولكن يجب عليك فى نفس الوقت أن تعترض بنفس الشدة ضد جميع المنحنيات التى تمثل تغير درجة الحرارة فى مدينة نيويورك أثناء الصيف الماضى مثلا أو ضد جميع المنحنيات التى تمثل التغير فى مستوى المعيشة خلال السنوات القليلة الماضية ، حيث أن نفس طريقة التمثيل البيانى متبعة فى كل من هـذه الأمثلة . ففى منحنيات درجة الحرارة نجمع بين متصل درجة الحرارة الأحادى البعد ومتصل الزمن الأحادى البعد ، مكونين متصلا ثنائى الأبعاد لدرجة الحرارة والزمن .

ولنرجع الان إلى مثال الجسيم الساقط من قمة البرج البالغ من الارتفاع ٢٥٦ قدماً . فصورة الحركة البيانية هى طريقة ذات فائدة عظمى لأنها تمكننا من تعيين مكان الجسيم عند أية لحظة . ونود الآن تمثيل حركة الجسيم مرة أخرى إذا عرفنا كيف يتحرك ، ويمكننا عمل ذلك بطريقتين مختلفتين .

لعلنا نذكر صورة الجسيم الذى يغير مكانه بمرور الزمن فى الفضاء ذى البعد الواحد . ولم نخلط فى تلك الصورة بين الزمن والمكان بل استخدمنا صورة ديناميكية تتغير فيها الاوضاع مع الزمن .

ولكن يمكننا تصوير نفس الحركة بطريقة أخرى استاتيكية نعتبر فيها منحنياً فى متصل المكان والزمان ذى البعدين . وفى هذه الحالة تمثل الحركة كشىء موجود فى متصل الزمن والمكان ذى البعدين ، وليس كشىء يتغير فى المتصل المكانى ذى البعد الواحد .

وتتكافأ هاتان الصورتان تماماً مع بعضهما ، وليس تفضيل طريقة على أخرى

سوى مسألة ذوق ، وليست هناك أية علاقة بين كل ما قلناه الآن وبين نظرية النسبية . ويمكننا استخدام أى من الصورتين دون تفرقة على الرغم من أن الطبيعة الكلاسيكية قد فضلت الصورة الديناميكية التى تصف الحركة كحوادث واقعة فى المكان وكأنه ليست لها وجود فى متصل المكان والزمان . ولكن النظرية النسبية غيرت وجهة النظر هذه ، إذ كانت إلى حد كبير فى جانب الصورة الاستاتيكية ، ووجدت فى كيفية تمثيل الحركة كشىء موجود فى الزمان والمكان صورة أكثر ملاءمة وقرباً من الحقيقة . وما زال علينا أن نجيب على هذا السؤال: لماذا لا تتكافأ صورتا تمثيل الحركة من وجهة نظر النظرية النسبية على الرغم من تكافئهما من وجهة نظر الطبيعة الكلاسيكية ؟

وسندرك الإجابة على هذا السؤال إذا اعتبرنا حركة مجموعتين إحداثيتين متحركتين بانتظام بالنسبة لبعضهما . فطبقاً لقواعد الطبيعة الكلاسيكية يحدد المشاهدان المقيمان فى هاتين المجموعتين احداثيات مكانية مختلفة وزمن واحد لحدث ما وإذن فى حالة مثالنا السابق يتميز انطباق الجسيم على سطح الأرض فى مجموعتنا الإحداثية المختارة بالاحداثى الزمنى « ٤ » وبالإحداثى المكانى صفر وسيظل الحجر طبقاً للميكانيكا الكلاسيكية يأخذ أربع ثوان لكى يصل إلى سطح الأرض فى نظر مشاهد يتحرك بانتظام بالنسبة للمجموعة الإحداثية المختارة . ولكن هذا المشاهد سيقيس المسافة فى مجموعته الإحداثية وسيربط بين هذه الإحداثيات المكانية وحدث التصادم على الرغم من أن الإحداثى الزمنى سيكون واحداً فى نظره وفى نظر جميع المشاهدين الآخرين المتحركين بانتظام بالنسبة لبعضهم . فالطبيعة الكلاسيكية لا تعرف سوى زمنا واحداً مطلقاً بالنسبة لجميع المشاهدين ، وفى هذه الحالة يمكننا شطر المتصل ذى البعدين لكل مجموعة احداثية إلى متصلين كل منهما ذو بعد واحد : الزمان والمكان . وبسبب الصفة المطلقة للزمن فإن الانتقال من الصورة الاستاتيكية إلى الصورة الديناميكية له معنى نظرى فى الطبيعة الكلاسيكية .

ولكننا سبق أن اقتنعنا بأن التحويلات الكلاسيكية يجب ألا تستخدم فى علم

الطبيعة بصفة عامة . ومن الناحية العملية تتحقق هذه التحويلات فقط فى حالة السرع الصغيرة .

وطبقاً لنظرية النسبية لن يكون زمن ارتطام الحجر مع سطح الأرض واحداً فى نظر جميع الشاهدين ، إذ سيختلف الاحداثى الزمنى والاحداثى المكانى فى المجموعتين الاحداثيتين ، وسيكون التغير فى الاحداثى الزمنى ملحوظاً جداً إذا اقتربت السرعة النسبية من سرعة الضوء . ولايمكننا شطر المتصل ذى البعدين إلى متصلين أحادى البعد ، كما هى الحال فى الطبيعة الكلاسيكية . ويجب ألا نعتبر المكان والزمان على حدة فى تعيين الاحداثيات المكانية والزمنية فى مجموعة احداثية أخرى . ويظهر أن شطر المتصل ذى البعدين إلى المتصلين الاحداثى البعد عملية اختيارية ليس لها أى معنى من وجهة النظر النسبية .

ومن السهل تعميم ماسبق قوله فى حالة الحركة العامة التى ليست فى خط مستقيم . وفى الحقيقة أنه يلزمنا أربعة أرقام ـ لارقين اثنين ـ لوصف الأحداث فى الطبيعة . وفضاء علم الطبيعة كما نتصوره خلال الأجسام وحركتها له ثلاثة أبعاد ، وتتعين حركة هذه الأجسام بواسطة ثلاثة أرقام . وتكوّن اللحظة التى وقع فيها الحدث الرقم الرابع . وبذلك تشير أى أربعة أرقام معينة إلى حدث ما ، كما أن أى حدث يتحدد بواسطة مثل هذه الأرقام الأربعة . وإذن يكون عالم الأحداث متصلا ذا أربعة أبعاد . وليس فى هذا شىء من الغرابة . وتتحقق العبارة الأخيرة فى حالتى الطبيعة الكلاسيكية ونظرية النسبية على السواء . ومرة ثانية نكتشف وجود فرق عند ما نعتبر حالة مجموعتين احداثيتين متحركتين بالنسبة لبعضهما . لنفرض أن لدينا حجرة متحركة ، وقد أخذ المشاهد المقيم داخلها وذلك المقيم خارجها فى تعيين الاحداثيات المكانية الزمانية لحدث ما . سيحاول عالم الطبيعة الكلاسيكية شطر المتصل ذى الأربعة أبعاد إلى فضاء ذى ثلاثة أبعاد ومتصل زمانى ذى بعد واحد . سيهتم عالم الطبيعة القديمة فقط بالتحويلات المكانية حيث أن الزمن شىء مطلق بالنسبة له ، وسيجد أن شطر المتصل الرباعى الأبعاد إلى متصل المكان ومتصل الزمان شيئاً طبيعيا وملائماً . ولكن من وجهة نظر النسبية يتغير الزمن والمكان

عند الانتقال من مجموعة احداثية إلى أخرى ، وتحدد لنا تحويلات لورنتز خواص تحويلات متصل الزمان والمكان ذى الأربعة أبعاد لعالم الأحداث الطبيعية ذى الأبعاد الأربعة .

ويمكننا وصف عالم الأحداث ديناميكيا بصورة تتغير مع الزمن وممثلة فى الفضاء ذى الثلاثة أبعاد . ولكن يمكن تمثيلها أيضاً بصورة استاتيكية فى المتصل الزمانى المكانى ذى الأربعة الأبعاد . ومن وجهة نظر الطبيعة الكلاسيكية تتكافأ الصورتان الاستاتيكية والديناميكية ، فى حين أنه من وجهة النظر النسبية تعتبر الصورة الاستاتيكية أكثر ملاءمة وقربا إلى الحقيقة .

ويمكننا استخدام الصورة الديناميكية حتى فى نظرية النسبية إذا فضلنا ذلك ولكن يجب أن تتذكر أن هذا الانقسام إلى زمان ومكان ليس له أى معنى حقيقى حيث أن الزمن ليست له صفة الاطلاق . وسنستمر فى استخدام اللغة الديناميكية لا الاستاتيكية فى الصفحات المقبلة متذكرين جيداً مواطن قصورها .

النسبية العامة :

مازالت لدينا نقطة فى حاجة إلى استجلاء ، إذ أننا لم نجب بعد على أحد الأسئلة الأساسية وهو : هل هناك مجموعة إحداثية قاصرة ؟ قد عرفنا بعض الشىء عن قوانين الطبيعة وعدم تغيرها بالنسبة لتحويلات لورنتز وانطباقها على جميع المجموعات القاصرة المتحركة بانتظام بالنسبية لبعضها . فلدينا القوانين ولكننا لانعرف الاحداثيات التى تنسب إليها هذه القوانين . ولكى نزداد إلماما بهذه المشكلة ، دعنا نناقش عالم الطبيعة الكلاسيكية ونسأله بعض أسئله بسيطة :

« ماهى المجموعة القاصرة ؟ »

« هى مجموعة إحداثية تتحقق فيها قوانين الميكانيكا ، فالجسم الذى لاتؤثر عليه قوى خارجية يتحرك بانتظام فى هذه المجموعة . وإذن يمكننا بفضل هذه الخاصية التمييز بين المجموعة الإحداثية القاصرة وبين أى مجموعة أخرى » .

« ولكن ماهو معنى القول بعدم وجود قوى تؤثر على الجسم ؟ »

« معناه ببساطة أن الجسم يتحرك بانتظام فى مجموعة إحداثية قاصرة » .

وهنا يمكننا أن نضع مرة ثانية السؤال «ماهى المجموعة الاحداثيةالقاصرة ؟ » ولكن بما أنه ليس هناك أمل كبير فى الحصول على إجابة تختلف عن الإجابة السابقة . فلنحاول أن نحصل على بعض معلومات بتغيير السؤال .

« هل تعتبر المجموعة الاحداثية المثبتة فى سطح الأرض مجموعة قاصرة ؟ »

« كلا ، لأن القوانين الميكانيكا لاتنطبق تماما علىسطحالأرض بسبب حركتها الدورانية ولكن يمكننا اعتبار مجموعة احداثية مثبتة فى الشمس مجموعة احداثية قاصرة فى كثير من المسائل ، ولكن عندما نتكلم عن حركة الشمس الدورانية فإننا نفهم ضمنيا أن مجموعة إحداثية مثبتة فيها لايمكن اعتبارها قاصرة تماما »

« وإذن ماهى مجموعتك الاحداثية القاصرة وكيف تختار حركتها ؟ »

« المجموعة الإحداثية القاصرة هى مجرد فكرة خيالية فقط وليست لدى أية فكرة عن إمكان تحقيقها فإذا أمكننى أن أبتعد عن جميع الأجسام المادية وأحرر نفسى منجميع التأثيرات الخارجية فإنمجموعتى الإحداثية تكون حينئذ قاصرة».

« ولكن ماذا تعنى بمجموعة إحداثية محررة من التأثيرات الخارجية ؟ »

« أعنى أن المجموعة الإحداثية تكون قاصرة » .

أى أننا قد رجعنا مرة أخرى إلى حيث بدأنا ! !

وهكذا كشف لنا هذا الحوار عن صعوبة خطيرة فىعلم الطبيعة الكلاسيكى . فلدينا قوانين ولكننا لا ندرى إلى أى مجموعة إحداثية ننسبها اليها ! وهكذا يبدو لنا أن عالمنا الطبيعى كله مبنى على أساس من الرمال .

ويمكننا مواجهة هذه المعضله من جانب آخر . لنتصور أن الكون بأجمعه لايحتوى سوى جسما ماديا واحداً سنتخذه ممثلا لمجموعتنا الاحداثية . ولنفرض أن هذا الجسم بدأ يدور حول نفسه . فطبقاً للميكانيكا الكلاسيكية ستكون القوانين

الطبيعية للجسم الدائر مختلفة عن تلك المناظرة لها فى الجسم الساكن . فإذا كانت قاعدة القصور الذاتى صحيحة فى حالة من هاتين الحالتين فإنها لن تصح فى الأخرى ، ولكن هذا القول غير سليم ، إذ هل يصح لنا أن نعتبر حركة جسم واحد فقط فى الكون بأجمعه ؟ مع اننا نعنى دائماً بحركة الجسم « هذا التغير فى موضعه بالنسبة لجسم آخر . وإذن يكون من غير الطبيعى أن نتكلم عن حركة جسم واحد فقط ، وهكذا تتعارض الميكانيكا الكلاسيكية مع الطبيعة حول هذه النقطة . وللخروج من هذا المأزق فرض نيوتن أنه إذا كانت قاعدة القصور الذاتى صحيحة فإن المجموعة الاحداثية تكون إما ساكنة أو متحركة بحركة منتظمة . وإذا كانت قاعدة القصور غير صحيحة فإن الجسم يتحرك حركة غير منتظمة ، وإذن يتوقف قولنا بالحركة أو السكون على ما إذا كانت جميع القوانين الطبيعية تنطبق أو لا تنطبق على مجموعة إحداثية معينة .

لنعتبر جسمين كالشمس والأرض مثلا . فالحركة التى نلاحظها هى حركة نسبية ، يمكن وصفها بتثبيت المجموعة الاحداثية بالأرض أو الشمس . ومن جهة النظر هذه يظهر لنا أن اكتشافات كوبرنيكوس العظيمة ليست سوى نقل المجموعة الاحداثية من الأرض إلى الشمس . ولكن بما أن الحركة نسبية ويمكننا استخدام أى مجموعة إحداثية فلن يكون لدينا أى سبب لتفضيل مجموعة إحداثية على أخرى .

وهنا يتدخل علم الطبيعة مرة أخرى ليغير وجهة نظرنا . فالمجموعة الإحداثية المتصلة بالشمس تشبه مجموعة قاصرة أكثر من تلك المتصله بالأرض ، ويجب أن تنطبق قوانين علم الطبيعة على مجموعة كوبرنيكوس الإحداثية أكثر من انطباقها على مجموعة بطليموس . ويمكن تقدير أهمية اكتشاف كوبرنيكوس فقط من وجهة نظر علم الطبيعة ، فهى ترينا الأهمية الفائقة لاستخدام مجموعة إحداثية مثبتة تماما فى الشمس لوصف حركة النجوم .

ولا توجد حركة منتظمة مطلقة فى علم الطبيعة الكلاسيكى . فإذا تحركت مجموعتان إحداثيتان بانتظام بالنسبة لبعضهما فليس هناك معنى للقول بأن « هذه المجموعة الإحداثية ساكنة والأخرى متحركة » . ولكن إذا كانت المجموعتان

الاحداثيتان متحركتين بدون انتظام بالنسبة لبعضهما فهناك مايدفعنا للقول «هذا الجسم يتحرك والآخر ساكن (أو يتحرك بانتظام) » . فالحركة المطلقة لها هنا معنى محدد تماما . وتوجد هنا هوة سحيقة تفصل بين المنطق من جانب والطبيعة الكلاسيكية من جانب آخر . وترتبط الصعوبات المذكورة والمتعلقة بالمجموعة القاصرة وبالحركة المطلقة ببعضها ، ويمكن أن تحدث الحركة المطلقة فقط على أساس المجموعة القاصرة التي تتحقق فيها قوانين الطبيعة .

ولعله يبدو أنه ليس هناك مخرج من هذه الصعوبات وأنه ليست هناك نظرية يمكن أن تكون بمنجى عنها . ويرجع ذلك إلى حقيقة كون قوانين الطبيعة تتحقق فقط في مجموعة خاصة من المجموعات الإحداثية أي المجموعة القاصرة . ويتوقف حل هذه المصاعب على الإجابة على السؤال التالي : هل يمكننا صياغة قوانين الطبيعة بحيث تتحقق في جميع المجموعات الإحداثية : ليس فقط في تلك التي تتحرك بانتظام ، بل أيضاً في تلك التي تتحرك أية حركة اختيارية بالنسبة لبعضها البعض ؟ إذا كان هذا في استطاعتنا فإننا سنتغلب على مصاعبنا وسنكون حينئذ قادرين على تطبيق قوانين الطبيعة في أية مجموعة إحداثية . ولن يكون هناك حينئذ أي معنى للتناحر بين آراء بطليموس وكوبرنيكوس الذي ازداد حدة في الأيام الأولى من تاريخ العلم . إذ يمكن استخدام أي مجموعة احداثية دون تفضيل ، وسيكون للجملتين « الشمس ساكنة والأرض متحركة » و « الشمس متحركة والأرض ساكنة » معنيان مختلفان خاصان بمجموعتين إحداثيتين مختلفتين .

هل نستطيع حقاً أن نبني علم طبيعة نسبي ، يتحقق في جميع المجموعات الاحداثية ؟ علم طبيعة ليس به مكان لما يسمى بالمطلق ولكن فقط للحركة النسبية ؟ حقاً إن هذا ممكن !!

ولدينا على الأقل دليل ـ رغماً من عدم قوته ـ يرشدنا إلى طريقة بناء علم الطبيعة الحديث . يجب أن ينطبق علم الطبيعة الحديث على جميع المجموعات الاحداثية وإذن ينطبق كذلك على الحالة الخاصة للمجموعة الإحداثية القاصرة . ونحن نعلم الآن قوانين المجموعة الاحداثية القاصرة . ويجب أن تتحول القوانين العامة الجديدة

المتحققة فى جميع المجموعات الإحداثية ـ فى الحالة الخاصة للمجموعة القاصرة إلى القوانين القديمة المعروفة .

وقد حلت معضلة صياغة قوانين علم الطبيعة لكل مجموعة إحداثية ، بمايسمى بنظرية النسبية العامة ، والنظرية السابقة التى تنطبق فقط على المجموعات القاصرة تسمى بنظرية النسبية الخاصة . ولا يمكن للنظريتين طبعاً أن يتعارضا مع بعضهما ، حيث أننا يجب دائماً أن نجعل القوانين العامة للمجموعة القاصرة تشمل القوانين القديمة لنظرية النسبية الخاصة . وكما كانت المجموعة الاحداثية القاصرة فيما مضى المجموعة الوحيدة التى صيغت فيها قوانين علم الطبيعة ، فإنها الآن ستكون هى الحالة النهائية الخاصة ، حيث أنه قد أصبح من الممكن لجميع المجموعات الاحداثية أن تتحرك أية حركة إختيارية بالنسبة لبعضهما البعض .

وهذا هو برنامج نظرية النسبية العامة . ولكننا يجب أن نكون أكثر غموضاً عن ذى قبل أثناء وصفنا للطريق الذى أدى إلى هذه النظرية . فالصعوبات الجديدة الناشئة من التطور العلمى تدفع نظريتنا لكى تكون أكثر ابهاما . ومازالت أمامنا مفاجآت غير منتظرة . ولكننا نهدف دائماً إلى التوصل إلى فهم أعمق للحقائق ، وقد أضيفت حلقات إلى سلسلة المنطق التى تربط بين النظرية والتجربة . ولكى نزيل من الطريق المؤدى من النظرية إلى التجربة (المشاهدة) الافتراضات المفتعلة غير الضرورية ، يجب علينا أن نزيد فى طول السلسلة كثيراً ، وكلما كانت فروضنا أساسية وأكثر سهولة كلما ازدادت وسائلنا الرياضية تعقداً ، وأصبح الطريق من النظرية إلى التجربة أطول وأكثر غموضاً وتعقيداً . ويمكننا القول ـ رغما عمايبدو فى ذلك من تناقض ـ بأن علم الطبيعة الحديث أسهل من علم الطبيعة القديم وإذن فهو يبدو أكثر صعوبة وتعقيداً . وكلما كانت صورتنا للعالم الخارجى أكثر سهولة وازدادت الحقائق التى تتضمنها ، كلما ازدادت معها قوة إيماننا بتناسق الكون ونظامه الدقيق .

وفكرتنا الجديدة بسيطة ! أن نبنى علم طبيعة يتحقق فى جميع المجموعات الإحداثية . ويؤدى تحقيق ذلك إلى صعوبات جمة ويدفعنا إلى استخدام وسائل

رياضية تختلف عن تلك التى استخدمناها حتى الآن فى علم الطبيعة . وسنشرح هنا فقط العلاقة بين تحقيق هذا البرنامج وبين مشكلتين أساسيتين وهما الجاذبية والهندسة .

خارج وداخل المصعد .

يعتبر قانون القصور الذاتى أول تقدم كبير فى علم الطبيعة ، بل حرى بنا أن نعتبره البداية الحقيقية لهذا العلم . وقد نشأ هذا القانون من التأمل فى تجربة مثالية أى فى حالة جسم يتحرك باستمرار دون أية مقاومة ودون أى تأثير لقوى خارجية . ومن هذا المثال وأمثلة أخرى كثيرة بعد ذلك أدركنا أهمية التجربة المثالية فى دراستنا . وسندرس هنا أيضاً تجارب أخرى مثالية ، وعلى الرغم من أن هذه التجارب ستبدو خيالية فإنها مع ذلك ستساعدنا على فهم كل ما نستطيع فهمه من نظرية النسبية باستخدام وسائلنا البسيطة .

وقد كان لدينا فيما سبق التجارب المثالية التى قمنا بها مستخدمين الحجرة المتحركة ، وسنستخدم الآن على سبيل التغيير مصعداً هابطا إلى سطح الأرض .

لنتصور مصعداً ساكنا عند قمة ناطحة سحاب ، أعلا بكثير من جميع الناطحات الحقيقية ، ولنفرض أن الأسلاك الحاملة للمصعد انقطعت فجأة وأن المصعد قد أخذ فى الهبوط نحو سطح الأرض . لنفرض أن الشاهدين داخل المصعد أخذوا فى القيام ببعض تجارب أثناء الهبوط ، ولن ندخل فى اعتبارنا وجود مقاومة الهواء أو الاحتكاك فى هذه التجربة المثالية . لنفرض أن أحد الشاهدين قد أخرج من أحد جيوبه منديلا وساعة ، ثم تركها يسقطان ، فماذا يحدث لهذين الجسمين ؟ . من وجهة نظر الشاهد الخارجى الذى يشاهد مايحدث خلال نافذة المصدر سيرى أن المنديل والساعة سوف يسقطان نحو الأرض بنفس الطريقة وبنفس العجلة . ونحن نذكر أن عجلة جسم ساقط لاتتوقف أبداً على كتلته ؟ وأن هذه الحقيقة هى التى أظهرت تساوى الكتلة الجاذبية والكتلة القاصرة (صفحة ٢٦) . ونحن نذكر أيضاً أن تساوى هاتين الكتلتين كان مجرد صدفة فقط من وجهة نظر الميكانيكا

الـكلاسيكية ولم يكن له أي أثر في تكوين هذه الميكانيكا . ومع ذلك فإننا نرى هنا أيضاً أن هذا التساوي ـ الذي ظهر أثره في تساوي العجلة لجميع الأجسام الساقطة ذو أهمية كبيرة وأساسي جداً لدراستنا كلها .

لنعود مرة أخرى إلى موضوع المنديل والساعة الساقطين ؛ فمن وجهة نظر المشاهد الخارجي يسقط كلا الجسمين بنفس العجلة . ولـكن المصعد بجدرانه وأسقفه سيسقط بنفس العجلة ، وإذن سيظل بعدا الجسمين المذكورين عن قاع المصعد ثابتين لا يتغيرا . أما من وجهة نظر المشاهد الداخلي فإن الجسمين سيظلان دائماً في مكانيهما ، تماماً كما تركهما المشاهد . وسيتجاهل المشاهد الداخلي مجال الجاذبية حيث أن مصدره يقع خارج مجموعته الإحداثية . وسيجد أنه ليست هناك أية قوى داخل المصعد تؤثر على الجسمين ولذا فهما في حالة سكون ، تماماً كما لو كانا في مجموعة إحداثية قاصرة . وسنرى أن أموراً غريبة تحدث داخل المصعد ! فإذا دفع المشاهد جسما في أي اتجاه ، إلى أسفل أو إلى أعلا مثلا ، فإن هذا الجسم سيظل دائماً يتحرك حركة منتظمة ، ما دام لا يرتطم بسقف المصعد أو قاعدته . وباختصار فإن قوانين الميكانيكا الـكلاسيكية تتحقق داخل المصعد في نظر المشاهد الداخلي . وستتحرك جميع الأجسام طبقاً لقانون القصور الذاتي . وستختلف مجموعتنا الإحداثية الجديدة المثبتة في المصعد الساقط عن المجموعة الأحداثية القاصرة في نقطة واحدة . يتحرك الجسم الذي لا تؤثر عليه أي قوة بانتظام إلى الأبد في المجموعة الأحداثية القاصرة . ولا تتقيد المجموعة الإحداثية القاصرة — كما فرضت في علم الطبيعة الـكلاسيكي — بمكان أو زمان . وحالة المشاهد في مصعدنا مختلفة إذ أن خاصية القصور الذاتي في مجموعته الإحداثية مقصورة على المـكان والزمان . وسيأتي الوقت الذي يصطدم فيه الجسم المتحرك مع جدران المصعد فتتغير حركته المنتظمة . وسيأتي أيضاً الوقت الذي يصطدم فيـه المصعد مع سطح الأرض فيقضي على المشاهدين وعلى تجاربهم أجمعين . فليست المجموعة الإحداثية سوى صورة مصغرة لمجموعة إحداثية قاصرة حقيقية .

والطابع المحلي للمجموعة الإحداثيـة جد أساسي . وإذا كان طول قاعدة

مصمدنا الهابط يمتد من القطب الشمالى إلى خط الاستواء ، ووضعنا المنديل فوق القطب الشمالى والساعة فوق خط الاستواء فإن المشاهد الخارجى سيحكم بأن هذين الجسمين لن تكون لهما نفس العجلة وإذن لن يكونا ساكنين بالنسبة لبعضهما . وبهذا تفشل استنتاجاتنا ! ! وإذن يجب أن يكون المصمد ذو أبعاد محدودة بحيث تكون عجلة جميع الأجسام ثابتة بالنسبة للمشاهد الخارجى . وعلى هذا الأساس ، يكون للمجموعة الإحداثية صفة القصور الذاتى بالنسبة للمشاهد الداخلى . ويمكننا دائماً إيجاد مجموعة إحداثية تتحقق فيها جميع القوانين الطبيعية على الرغم من كونها محدودة فى المكان والزمان . فإذا تخيلنا مجموعة إحداثية أخرى، كمصعد آخر يتحرك بانتظام بالنسبة للمصعد الآخر الساقط تحت تأثير الجاذبية وحدها فإن كلا من هاتين المجموعتين الإحداثيتين ستكون قاصرة محلياً . وستكون القوانين نفسها متتحققة فى كلا المجموعتين، ويمكننا الانتقال من مجموعة إلى أخرى باستخدام تحويلات لورنتز.

ولنستمع الآن إلى وصف كل من المشاهدين الخارجى والداخلى لما يحدث داخل المصعد .

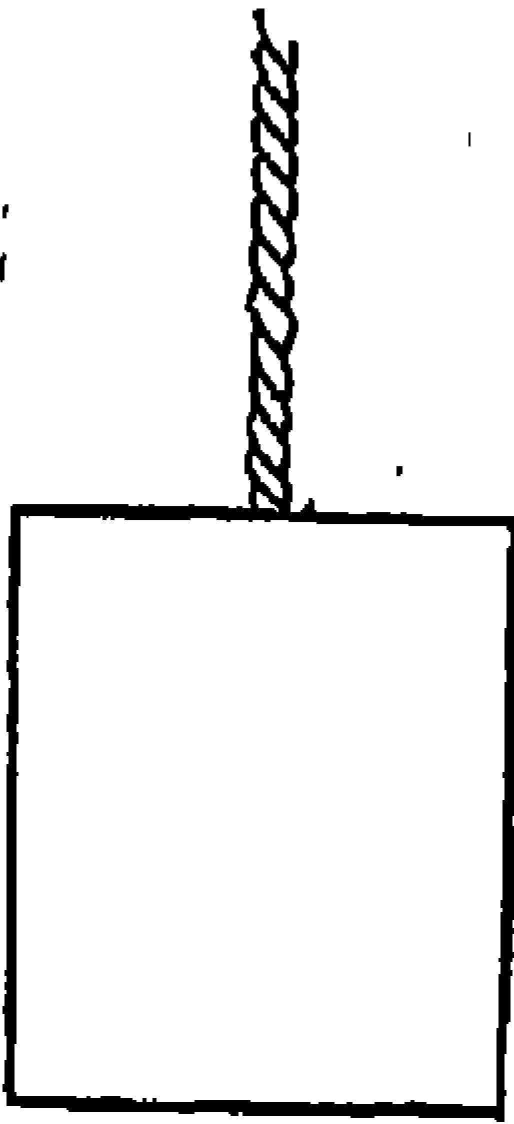
سيلاحظ الشاهد الخارجى حركة المصعد وجميع الأجسام الكائنة داخله وسيجدها متفقة مع قانون نيوتن للجاذبية . وبالنسبة له لن تكون الحركة منتظمة بل ذات عجلة بسبب فعل مجال الجاذبية الأرضية . ولكن إذا افترضنا وجود جيل من علماء الطبيعة ، ولدوا ونشأوا فى المصعد فإن آراؤهم بصدد ما يحدث فى المصعد ستكون جد مختلفة ، إذ سيعتقدون فى وجود مجموعة قاصرة وسينسبون جميع قوانين الطبيعة إلى مصعدهم ، لأنهم يعتقدون — بحق — أن القوانين تأخذ صورة بسيطة فى مجموعتهم الإحداثية . وسيكون من الطبيعى فى رأيهم الفرض بأن مصعدهم ساكن لا يتحرك وأن مجموعتهم الإحداثية قاصرة .

ومن المستحيل فض الخلاف فى الرأى بين المشاهدين الخارجى والداخلى ، فكل منهما يعتقد أن الصواب هو فى نسبة جميع الإحداث إلى مجموعته الإحداثية ويمكن وضع كل من الرأيين فى وصف الظواهر الطبيعية فى صيغة مقبولة .

ونرى من هذا المثال أنه يمكن وضع نظريتين مقبولتين لوصف الظواهر

الطبيعية فى مجموعتين إحداثيتين ، حتى ولو لم يكونا متحركين بانتظام بالنسبة لبعضهما . وفى مثل هذه النظريات يجب أن نعتبر « الجاذبية » فتكون بذلك « قنطرة » تمكننا من الانتقال من مجموعة إحداثية إلى أخرى . سيشعر المشاهد الخارجى بوجود مجال الجاذبية فى حين أن المشاهد الداخلى لن يعترف بوجوده . سيرى المشاهد الخارجى أن المصعد يتحرك بعجلة فى مجال الجاذبيـة الأرضية ، فى حين أن المشاهد الداخلى سوف يجزم بعدم وجود أى مجال للجاذبية فى مجموعته ، ولـكن « القنطرة » — أى مجال الجاذبية — التى سببت إمكان صياغة القوانين فى صورة مقبولة فى كلا المجموعتين ، تتصل اتصالا وثيقاً بالتكافؤ بين كتلة الجاذبية والـكتلة القاصرة . وبدون هذا الدليل — الذى لم تتنبه إليه الميكانيكا الكلاسيكية — لن يكون هناك أى أساس لدراستنا الحالية .

لنعتبر الآن تجربة أخرى مثالية . لنفرض أن هناك مجموعة إحداثية قاصرة يتحقق فيها قانون القصور الذاتى . وقد سبق أن وصفنا ما يحدث فى مصعد ساكن فى مثل هذه المجموعة الإحداثية القاصرة . ولـكننا سنغير تلك الصورة الآن . لنفرض أن حبلا قد ثبت فى المصعد وأن قوة ما ثابتة أخذت فى شد المصعد إلى أعلا فى الاتجاه المبين فى الرسم . ولن يهمنا كيفية عمل ذلك . وحيث أن قوانين الميكانيكا تتحقق فى هـذه المجموعة الإحداثية فإن المصعد كله سيتحرك بعجلة ثابتة فى اتجاه الحركة . لنستمع الآن مرة أخرى إلى ما يقوله كل من المشاهدين الخارجى والداخلى فى وصف الظواهر التى تحدث فى المصعد .



المشاهد الخارجى : : مجموعتى الإحداثية قاصرة . إنى أشاهد المصعد يتحرك بعجلة ثابتة ، لأن هناك قوة ثابتة تؤثر عليه ، وسيكون المشاهدون داخل المصعد فى حركة مطلقة ولذا لن تتحقق قوانين الميكانيكا بالنسبة لهم . ولن يجدوا مثلا أن الأجسام التى لا تؤثر عليها أنه قوى تظل ساكنة . وإذا ترك جسم فى هواء المصعد فإنه سرعان ما يصطدم بقاعدة المصعد ، لأن تلك القاعدة تتحرك إلى أعلا

مقتربة من الجسم الساقط . ويحدث مثل هذا تماماً للساعة والمنديل . ويبدو من غير المألوف فى نظرى أن يظل المشاهد الداخلى ملازماً لقاعدة المصعد ، لأنه إذا قفز إلى أعلا فسرعان ما تلحق قاعدة المصعد .

المشاهد الداخلى : إننى لا أرى ما يجعلنى أعتقد أن المصعد فى حركة مطلقة . وأعتقد أن مجموعتى الإحداثية المثبتة فى المصعد ليست حقيقة مجموعة قاصرة ولكننى لا أرى أن هذا له علاقة بالحركة المطلقة . فساعتى ومنديلى وجميع الأجسام تسقط نحو القاعدة لأن المصعد كله وقع تحت تأثير مجال الجاذبية . وأشاهد نفس أنواع الحركة كما يشاهدها المقيم على سطح الأرض بالضبط . وهو يشرحها بمنتهى البساطة على أساس الفرض بوجود مجال الجاذبية . وينطبق هذا الوصف تماماً على الحالة التى أنا بها .

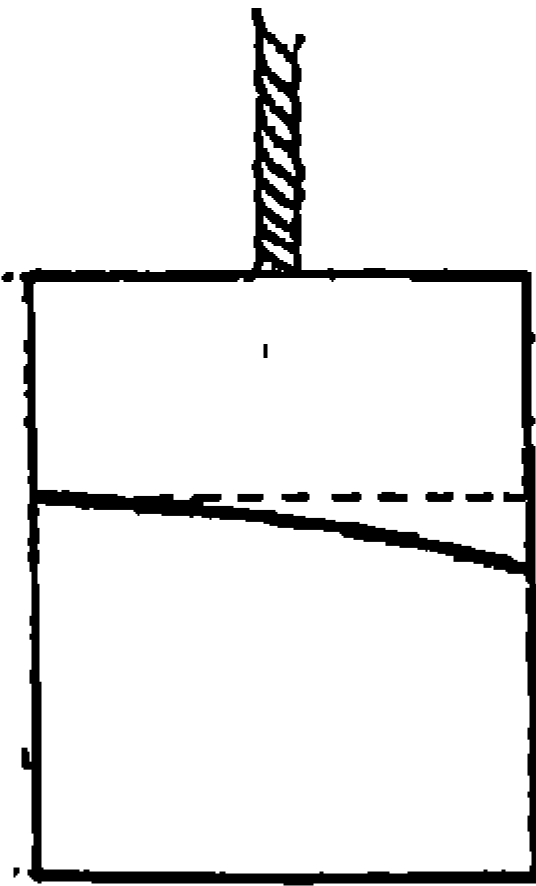
وهذا الوصف للظواهر الطبيعية من وجهتى نظر المشاهدين الخارجى والداخلى مقبول فى حد ذاته ولا يمكننا أن نقرر أيهما هو الصواب . ويمكننا اتباع أياً منهما لوصف الظواهر التى تحدث فى المصعد : إما الحركة غير المنتظمة وعدم وجود مجال الجاذبية فى رأى المشاهد الخارجى ، أو السكون ووجود مجال الجاذبية بالنسبة للمشاهد الداخلى .

ويمكن للمشاهد الخارجى أن يفرض أن المصعد فى حركة مطلقة غير منتظمة ولكن الحركة تحت تأثير مجال الجاذبية لا يمكن تسميتها حركة مطلقة .

ولعل هناك طريقاً للخلاص من التردد بين هاتين الطريقتين فى وصف أحداث الطبيعة ، ولعلنا نستطيع التوصل إلى رأى خاص باتباع إحدى هاتين الطريقتين . لنفرض أن شعاعا من الضوء مر خلال المصعد فى اتجاه أفقى خلال نافذة جانبية ووصل إلى الجانب الاخر فى برهة قصيرة . لنستمع مرة أخرى إلى رأى المشاهدين السابقين فى مسار الضوء .

سيصف المشاهد الخارجى — الذى يعتقد فى أن المصعد يتحرك بعجلة — هذه الظاهرة لنا بقوله : يدخل الشعاع الضوئى من نافذة المصعد ويتحرك أفقياً

فى خط مستقيم بسرعة ثابتة فى اتجاه جدار المصعد المقابل للنافذة . ولكن المصعد يتحرك إلى أعلا ، ولذا فإن الضوء عند وصوله إلى الجدار المقابل ، يكون المصعد قد ارتفع عن مكانه قليلا ، وإذن سيقع الشعاع الضوئى على الجدار فى نقطة أسفل من تلك التى تقابل نقطة دخول الشعاع الضوئى . وسيكون الفرق طفيفاً جداً ولكن وجوده حقيقة لا شك فيها ، وسيرى من بالمصعد أن الضوء لا يتحرك فى خطوط مستقيمة بل فى خطوط منحنية . وينجم هذا الفرق عن المسافة التى ارتفعها المصعد فى نفس الزمن الذى يمر فيه الضوء خلاله .



سيقول المشاهد الداخلى — الذى يعتقد بوجود مجال الجاذبية الذى يؤثر على جميع الأجسام الموجودة بالمصعد — ليست هناك أية حركة ذات عجلة بالمصعد ولكننى أشعر فقط بوجود مجال جاذبية . والشعاع الضوئى لا وزن له وإذن لن يتأثر بفعل الجاذبية . فإذا أرسل شعاع فى اتجاه أفقى فإنه سيقابل الحائط فى نقطة تقابل تماماً تلك التى أرسل منها .

ويبدو من هذا أن هناك احتمالا للحكم فى جانب إحدى هاتين النظريتين المختلفتين ، لأن الظاهرة الأخيرة ستكون مختلفة فى نظر كل من المشاهدين . وإذا كان هناك شىء غير منطقى فى إحدى هاتين النظريتين فإن أسس دراستنا كلها تنهار ؛ ولا يمكننا أن نصف كل الظواهر بطريقتين مقبولتين على أساس فرض وجود مجال للجاذبية أو عدم وجوده .

ومن حسن الحظ أن هناك خطأ كبيراً فى تعليل المشاهد الداخلى ، إذ يقول إن شعاع الضوء لا وزن له وبذلك لن يتأثر بفعل الجاذبية ، لأن ذلك لا يمكن أن يكون صحيحاً ! فالشعاع الضوئى يحمل طاقة وللطاقة كتلة . وتتأثر كل كتلة قاصرة بمجال الجاذبية لأن الكتلة القاصرة وكتلة الجاذبية متكافئتان . وإذن ينحنى الشعاع الضوئى فى مجال الجاذبية تماماً كما يحدث لجسم قذف بسرعة الضوء فى اتجاه أفقى .

ولو أبدى الشاهد الداخلى أسباباً صحيحة واعتبر انحناء الأشعة الضوئية فى مجال الجاذبية لا تفقت نتائجه مع ما يراه الشاهد الخارجى .

وطبيعى أن مجال الجاذبية الأرضية ضعيف جداً لدرجة أننا لا نستطيع قياس انحناء الأشعة الضوئية عملياً . ولكن التجارب الشهيرة التى أجريت أثناء خسوف الشمس قد أظهرت بشكل قاطع — وإن يكن غير مباشر — تأثير مجال الجاذبية على مسار شعاع ضوئى .

وينتج من هذه الأمثلة أن هناك أملا قوياً فى بناء علم الطبيعة على أساس النظرية النسبية . ولكن يجب أولا أن ندرس موضوع الجاذبية .

وقد رأينا من مثال المصعد الصورتين المقبولتين لوصف أحداث الطبيعة . فقد نفرض وجود حركة غير منتظمة وقد لا نفرضها . ويمكننا حذف الحركة « المطلقة » من أمثلتنا بفرض وجود مجال للجاذبية . أى أن الحركة غير المنتظمة ليس فيها شىء من صفة الإطلاق ، إذ أن مجال الجاذبية يقضى عليها قضاء مبرماً .

ويمكننا طرد أشباح الحركة المطلقة والمجموعة الأحداثية القاصرة من علم الطبيعة وبناء علم طبيعة نسبى . وترينا تجاربنا المثالية كيف يرتبط موضوع نظرية النسبية العامة ارتباطاً وثيقاً مع موضوع الجاذبيــة ولماذا يعتبر تكافؤ الكتلة القاصرة مع كتلة الجاذبية ذا أهمية بالغة فى هذا الارتباط . ومن الواضح أن حل موضوع الجاذبية فى النظرية العامة للنسبية يجب أن يختلف عن الحل المبنى على أساس نظرية نيوتن . يجب أن تصاغ قوانين الجاذبية — ككل القوانين الطبيعية — لجميع المجموعات الإحداثية الممكنة ، فى حين أن قوانين الميكانيكا الكلاسيكية كما صاغها نيوتن تتحقق فقط فى المجموعات الإحداثية القاصرة .

الهندسة والتجربة :

لعل مثالنا التالى يكون أكثر إمعاناً فى الخيال من مثال المصعد الساقط . وعلينا الآن أن ندرس موضوعاً جديداً وهو الصلة الموجودة بين نظرية النسبية العامة وبين الهندسة ولنبدأ بوصف عالم تعيش فيــه مخلوقات ذات بعدين فقط .

وليست ذات أبعاد ثلاثة مثلنا ، وقد عودتنا السينما على المخلوقات ذات البعدين التى تمثل وتعيش على الشاشة ذات البعدين أيضاً . لنتصور أن هذه الأشكال الخيالية — أى الممثلين على الشاشة — لها وجود حقيقى وتتميز بالقدرة على التفكير والقيام بدراسات علمية وأن الشاشة ذات البعدين تمثل الفضاء الهندسى لهذه المخلوقات وستكون هذه المخلوقات عاجزة عن تخيل وجود فضاء ذى ثلاثة أبعاد ، تماماً كما أننا نعجز عن تخيل عالم ذى أربعة أبعاد . وستعرف هذه المخلوقات الخطوط المستقيمة والمنحنية والدوائر ولكنها ستعجز عن بناء كرة لأن هذا يتطلب منها الابتعاد عن الشاشة ذات البعدين . ونحن فى موقف مماثل إذ نستطيع ثنى الخطوط المستقيمة والسطوح ولكن يشق علينا تصور انحناء فضاء ذى ثلاثة أبعاد .

وتستطيع الأشباح الثنائية الأبعاد الإلمام بأصول هندسة اقليدس ذات البعدين بواسطة المعيشة والتفكير والتجارب . فيمكنها مثلا اثبات أن مجموع زوايا المثلث تساوى ١٨٠ درجة ويمكنها كذلك رسم دائرتين متحدتين فى المركز ، إحداهما صغيرة والأخرى كبيرة . وستجد أن نسبة محيطى هاتين الدائرتين إلى بعضهما تساوى نسبة نصف القطرين ، وهى نتيجة مميزة لهندسة اقليدس . فإذا كانت الشاشة لانهائية فى الكبر فإن هذه المخلوقات ستجد أنها إذا حاولت القيام برحلة فى خط مستقيم فإنها لن ترجع أبداً إلى النقطة التى بدأت منها رحلتها .

لنتصور أن هذه المخلوقات الثنائية الأبعاد تعيش فى ظروف مختلفة . لنتصور مثلا أن شخصاً من العالم ذى الثلاثة أبعاد قد حمل هذه المخلوقات ونقلها من الشاشة إلى سطح كرة ذات نصف قطر كبير جداً . فإذا كانت هذه الأشباح صغيرة جداً بالنسبة للسطح كله وإذا لم تكن لديهم وسائل للمواصلات البعيدة ولا يمكنهم التحرك طويلا فإنهم لن يدركوا أى تغير ، فمجموع الزوايا فى المثلثات الصغيرة ستساوى ١٨٠ درجة ، وستظل نسبة نصفى قطرى دائرتين صغيرتين متحدتين فى المركز كنسبة محيطيهما . وستكون الرحلة فى خط مستقيم غير مؤدية إلى نقطة الابتداء فى رأيهم .

ولكن لنفرض أن هذه الأشباح قد أخذت بمرور الوقت فى تنمية معلوماتها

الفتية والعلمية فاكتشفوا وسائل للمواصلات تمكنهم من قطع المسافات الطويلة بسرعة . فسرعان مايجدوا حينئذ أنه عند بدء رحلة فى خط مستقيم سيرجعون فى النهاية إلى حيث بدأوا . وسيمنى الخط المستقيم الدائرة الكبيرة للكرة . وستجد هذه الأشباح أيضاً أن نسبة محيطى الدائرتين المتحدتين فى المركز ليست مساوية لنسبة نصفى القطرين ، إذا كان أحد نصف القطرين صغيراً والآخر كبيرا .

فإذا كانت مخلوقاتنا ذات البعدين محافظة وكانت قد تعلمت الهندسة الاقليدية منذ أجيال ماضية عندما لم يكن فى استطاعتها السفر بعيداً وعندما كانت هذه الهندسة منطبقة على الحقائق العلمية ، فانهم سيحاولون جاهدين التمسك بها رغم نتائج قياساتهم . سيحاولون نسبة تلك الاختلافات إلى أسباب طبيعية كتغيرات فى درجة الحرارة تؤدى إلى تغير اشكال الخطوط المستقيمة وتسبب خرق قواعد هندسة إقليدس . ولكنهم سيجدون إن آجلا أو عاجلا أن هناك طريقا أقرب إلى المنطق لوصف تلك الحوادث . سوف يدركون أن عالمهم محدود ذو قواعد هندسية تختلف عن تلك التى تعلموها . سيفهمون أنه على الرغم من عجزهم عن تخيل ذلك فإن عالمهم هو سطح كرة ثنائى الأبعاد . وسرعان ماسيتعلمون قواعد هندسية جديدة ستكون — على الرغم من اختلافها عن هندسة إقليدس — مصاغة فى قالب منطق مقبول ، تنطبق على عالمهم ذى البعدين . وفى رأى جيل جديد ، درج على معرفة هندسة الكرة ستظهر هندسة إقليدس القديمة أكثر تعقيداً وغير طبيعية لأنها لاتتفق مع الحقائق العملية .

لنرجع الآن إلى مخلوقات عالمنا ذات الأبعاد الثلاثة .

ماذا نعنى بقولنا إن العالم ذا الأبعاد الثلاثة له طابع إقليدى ؟ معنى ذلك أننا نستطيع بالتجربة المباشرة إثبات جميع نظريات هندسة إقليدس المنطقية . ويمكننا بفضل استخدام الأجسام المتماسكة أو الأشعة الضوئية تكوين أو بناء أجسام تشبه الأجسام المثالية فى هندسة إقليدس . فحافة المسطرة أو الشعاع الضوئى تشبه الخط المستقيم ، وجميع زوايا المثلث المكون من قضبان متماسكة يساوى ١٨٠ درجة ، ونسبة نصفى أقطار دائرتين متحدتين فى المركز ومصنوعتين من سلك دقيق تساوى

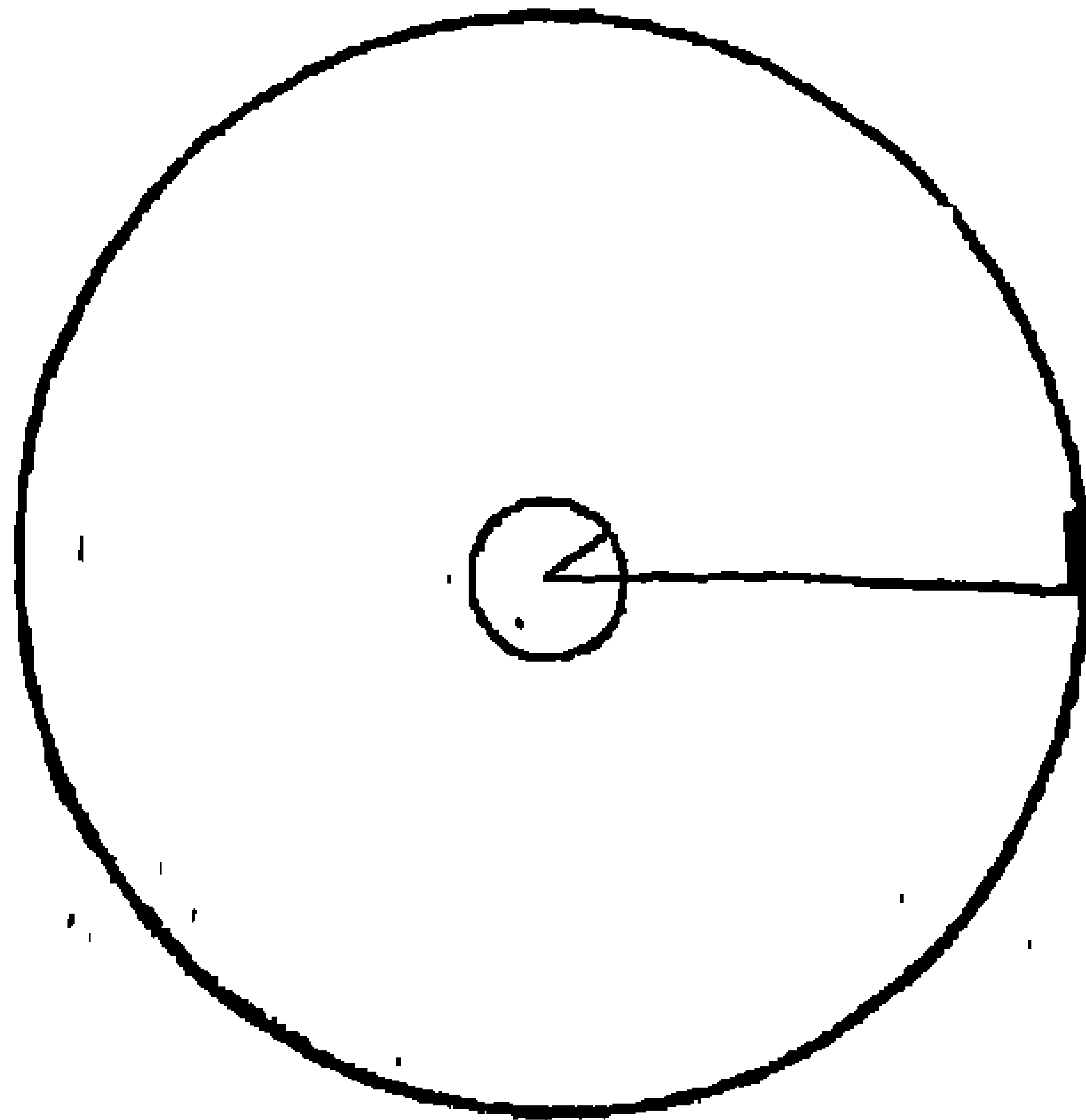
النسبة بين طولى المحيطين . فبهذه الطريقة تصبح هندسة إقليدس فصلا من علم الطبيعة.
ولكننا نستطيع تخيل إكتشاف انحرافات ، فمثلا مجموع زوايا مثلث كبير مصنوع من قضبان صلبة متماسكة يختلف عن ١٨٠° . ولكي ننقذ هندسة اقليدس يجب أن نفرض أن الأجسام ليست صلبة تماما وبأنها لاتصلح لكي نستخدمها فى تمثيل هندسة إقليدس . وسنحاول أن نوجد للأجسام تمثيلا أفضل يتفق مع مبادىء هندسة إقليدس . فإذا لم ننجح فى الربط بين هندسة إقليدس وعلم الطبيعة فى صورة بسيطة مقبولة فإن علينا أن ننبذ فكرة كون فضائنا إقليديا ، ونبحث عن صورة أكثر تناسقاً فى تمثيل الحقيقة وتحتوى على افتراضات عامة . متعلقة بالخواص الهندسية لفضاء عالمنا .

ويمكننا التدليل على ضرورة ذلك بتجربة مثالية تثبت لنا ، أنه لكي يكون لعلم الطبيعة خواص نسبية حقيقية يجب ألا نبنيه على أساس الخواص الإقليدية . وستتطلب دراستنا نتائج معروفة خاصة بالمجموعات الإحداثية القاصرة ونظرية النسبية الخاصة .

لنتصور قرصاً كبيراً مرسوما عليه دائرتان متحدتا المركز ، إحداهما صغيرة والأخرى كبيرة جداً ، ولنفرض أن القرص أخذ يدور بسرعة كبيرة بالنسبة لمشاهد خارجى فى حين أن هناك مشاهداً آخر مستقراً فوق هذا القرص . سنفرض أيضاً أن مجموعة المشاهد الخارجى الإحداثية مجموعة قاصرة وأنه رسم فى مجموعته الإحداثية نفس الدائرتين الصغرى والكبرى . وحيث أن الهندسة الإقليدية تتحقق فى مجموعته ، فإنه سيجد أن نسبة المحيطين ستساوى نسبة نصف القطرين . أما بخصوص المشاهد المستقر فوق القرص فإن علم الطبيعة الكلاسيكى وكذلك النظرية النسبية الخاصة لاتسمح لنا باتباع مثل هذه المجموعات الاحداثية ، ولكن إذا رغبنا فى البحث عن صيغ جديدة للقوانين الطبيعية تتحقق فى أية مجموعة احداثية فإننا يجب أن نهتم بدراسة وجهات نظر المشاهدين الداخلى والخارجى على حد سواء . ونحن هنا فى الخارج نرقب المشاهد الداخلى فى محاولته لقياس طول محيط ونصف قطر كل من الدائرتين على القرص الدائر ، باستخدام نفس قضيب القياس الصغير الذى يستخدمه المشاهد الخارجى . وكلمة «نفس» هنا تعنى إما حقيقة نفس

المقياس بأن يتسلمة المشاهد الداخلي من الخارجي أو بأنه كان أحد مقياسين لهما نفس الطول في مجموعة إحداثية ساكنة .

سيبدأ المشاهد الداخلي من فوق القرص بقياس نصف القطر والمحيط للدائرة الصغيرة ويجب أن تتفق نتيجته مع نتيجة المشاهد الخارجي . وحيث أن محور دوران القرص يمر خلال مركز القرص فإن أجزاء القرص القريبة من المركز ستكون ذات سرعة بسيطة جداً . فإذا كانت الدائرة الصغيرة ذات نصف قطر صغير جداً فإننا يمكننا تجاهل النظرية النسبية الخاصة واستخدام الميكانيكا الكلاسيكية، وينتج من ذلك أن قضيب القياس سيكون له نفس الطول بالنسبة للمشاهدين الداخلي والخارجي وأن نتيجة القياس ستكون واحدة بالنسبة لكليهما . لنفرض الآن أن المشاهد الداخلي قد بدأ في قياس نصف قطر الدائرة الكبيرة ووضع المقياس فعلا على نصف القطر مستمراً في عمليته . سيرى المشاهد الخارجي أن قضيب المقياس يتحرك في اتجاه عمودي على طوله وبذا لن يعاني انكماشاً في الطول وسيظل كما هو، أي ثابتا بالنسبة لجميع المشاهدين أي أن ثلاثاً من الأربعة كميات التي نريد قياس أطوالها لن تتأثر بحركة دوران القرص وهي نصفا القطرين ومحيط الدائرة الصغيرة ولكن الحالة ليست كذلك بالنسبة للكمية الرابعة ! فسيكون طول محيط الدائرة الكبيرة مختلفاً بالنسبة للمشاهدين . فعند وضع قضيب القياس على المحيط في اتجاه الحركة سينكمش طوله بالنسبة للمشاهد الخارجي — أي بالنسبة إلى قضيب مقياسه — في مجموعته الساكنة . وحيث أن السرعة كبيرة جداً بالنسبة لحالة الدائرة الصغيرة فإننا لا يمكننا التغاضي عن هذا الانكماش. فإذا استخدمنا نتائج نظرية النسبية الخاصة فإن استنتاجنا سيكون : إن نتائج قياس محيط الدائرة الكبيرة ستكون مختلفة بالنسبة للمشاهدين الداخلي والخارجي . وحيث أن إحدى الأطوال الأربعة المراد



قياسها ، فقط قد اختلفت ، فإن نسبة نصفى القطرين لايمكن أن تساوى نسبة محيطى الدائرتين بالنسبة لكل من المشاهدين الداخلى والخارجى . ومن هذا ينتج أن هندسة إقليدس لايمكن أن تنطبق على حالة القرص الدائر .

وعند الوصول إلى هذه النتيجة يمكن للمشاهد المستقر فوق القرص أن يعترض بقوله أنه يود اعتبار المجموعة الإحداثية التى لا تتحقق فيها هندسة إقليدس . وينسب عدم انطباق هندسة إقليدس إلى الحركة الدورانية المطلقة ؛ إلى حقيقية كون مجموعته الإحداثية مجموعة غير مقبولة وغير مسموح لنا استخدامها . ولكن الاعتراض بهذه الطريقة ينطوى على رفض المشاهد الداخلى قبول الفكرة الأساسية للنظرية العامة للنسبية . ومع ذلك فإذا رغبنا فى نبذ الحركة المطلقة واتباع آراء النظرية العامة للنسبية فإن علم الطبيعة يجب أن يبنى على أساس نوع من الهندسة يكون أكثر تعمما من هندسة إقليدس . وليست هناك طريقة ما للتخلص من هذه النتيجة ما دام من المسموح به استخدام جميع المجموعات الإحداثية .

والتغييرات التى استحدثتها نظرية النسبية العامة لاتنحصر فى المكان وحده . وقد كان لدينا فى النظرية النسبية الخاصة ساعات متشابهة تماما وتدور بكيفية واحدة وكانت مثبتة فى كل مجموعة إحداثية . ولعلنا نتساءل الآن عما يحدث لساعة تابعة لمجموعة إحداثية غير قاصرة : سنرجع ثانية إلى مثال القرص الدائر ونحاول استخلاص الإجابه . سيكون فى حوزة المشاهد الخارجى مجموعة من الساعات المضبوطة والموحدة التقدير ، مثبتة فى مجموعته القاصرة . سيأخذ المشاهد الداخلى ساعتين من نفس النوع وسيضع إحداها على الدائرة الداخلية الصغيرة والأخرى على الدائرة الخارجية الكبيرة . سيكون للساعة المثبتة فى الدائرة الصغيرة سرعة صغيرة جداً بالنسبة للمشاهد الخارجى ويمكننا إذن أن نقول بأن نظام توقيتها سيكون مشابها لتوقيت ساعة المشاهد الخارجى . ولكن سرعة الساعة المثبتة فى الدائرة الكبيرة سرعة كبيرة جداً ، ولذا فإن نظام توقيتها سيختلف كثيراً عن توقيت ساعات المشاهد الخارجى ، وإذن ستختلف أيضاً عن توقيت الساعة الموضوعة على الدائرة الصغيرة . وإذن سيكون نظام توقيت الساعتين الدائرتين مختلفا ،

وبتطبيق نتائج نظرية النسبية الخاصة نرى أنه فى مجموعتنا الإحداثية ذات الحركة الدورانية لا يمكننا عمل ترتيبات مشابهة لتلك الموجودة فى مجموعة إحداثية قاصرة.

ولإيضاح الاستنتاجات التى يمكننا الحصول عليها من هـذه التجربة ومن مثيلاتها السابقة سنذكر جانباً من الحديث الذى سبق ذكر بعضه بين العالم الطبيعى القديم « ں » الذى يؤمن بالطبيعة الكلاسيكية وبين العالم الطبيعى الحديث « ح » الذى يعرف نظرية النسبية العامـة . و « ں » هو المشاهد الخارجى فى المجموعة الإحداثية القاصرة بينما « ح » هو المشاهد المقيم فوق القرص الدائر .

« ں » : لا تتحقق الهندسة الإقليدية فى مجموعتك الإحداثية . لقد شاهدت قياساتك وأوافقك على أن نسبة طولى المحيطين فى مجموعتك الإحداثيـة ليست مساوية للنسبة بين نصفى القطرين . ولـكن هـذا يثبت أن مجموعتك الإحداثية مجموعة غير مسموح بها . أما مجموعتى فتتميز بطابع القصور الذاتى . ويمكننى استخدام هندسة جاليليو دون أى تفـكير . والقرص الذى يدور بك ذو حركة مطلقة وإذن فهو يمثل مجموعة إحداثية غير مقبولة من وجهة النظر الـكلاسيكية ، لا تتحقق فيها قوانين الميكانيكا .

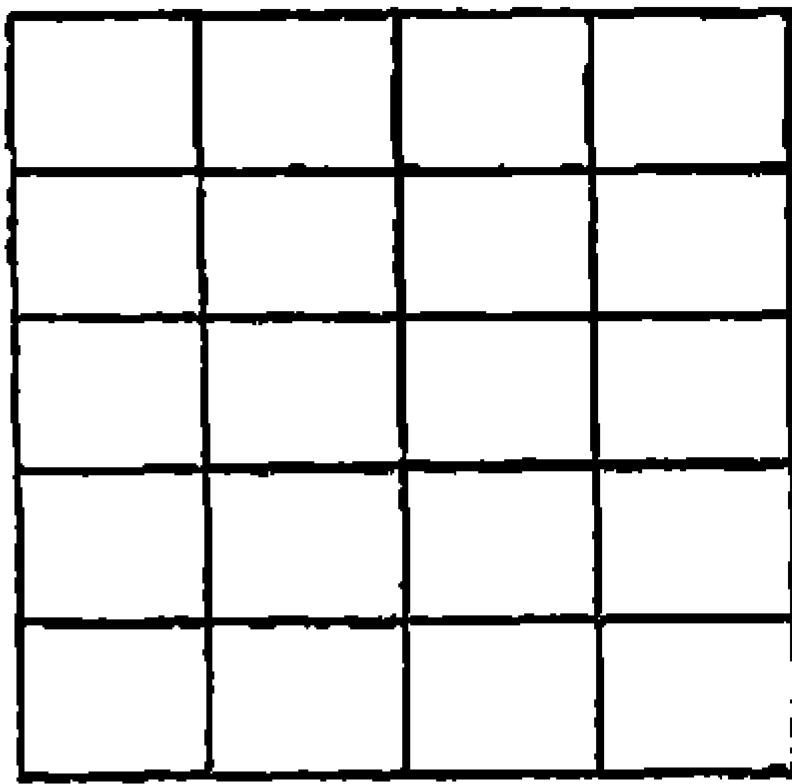
« ح » : لا أود سماع أى شىء يتعلق بالحركة المطلقة ، وتستوى مجموعتى الإحداثية مع مجموعتك سواء بسواء ، لا فرق بينهما . وقد نشأ ما لاحظته عن حركة قرصك الدورانية بالنسبة للقرص الذى أقيم عليه . وليس هناك ما يمنعنى من أن أنسب كل الحركات إلى القرص الذى أعيش فوقه .

«ں» : ولـكن ألا تشعر بقوة غريبة تحاول دفعك بعيداً عن مركز القرص ؟ فلو لم يكن قرصك دائراً بسرعة كبيرة فإن ما لاحظته ما كان ليحدث أبداً . فإنك ما كنت تشعر بالقوة التى تدفعك إلى الخارج كما أنك ما كنت لتلاحظ أن هندسة إقليدس لا تنطبق فى مجموعتك الإحداثية ، أما تعتقد أن فى هذه الحقائق ما يكفى لإقناعك بأن مجموعتك الإحداثية فى حركة مطلقة ؟

« ح » : كلا . كلا ! إنى حقاً قد لاحظت الظاهرتين اللتين أشرت إليهما

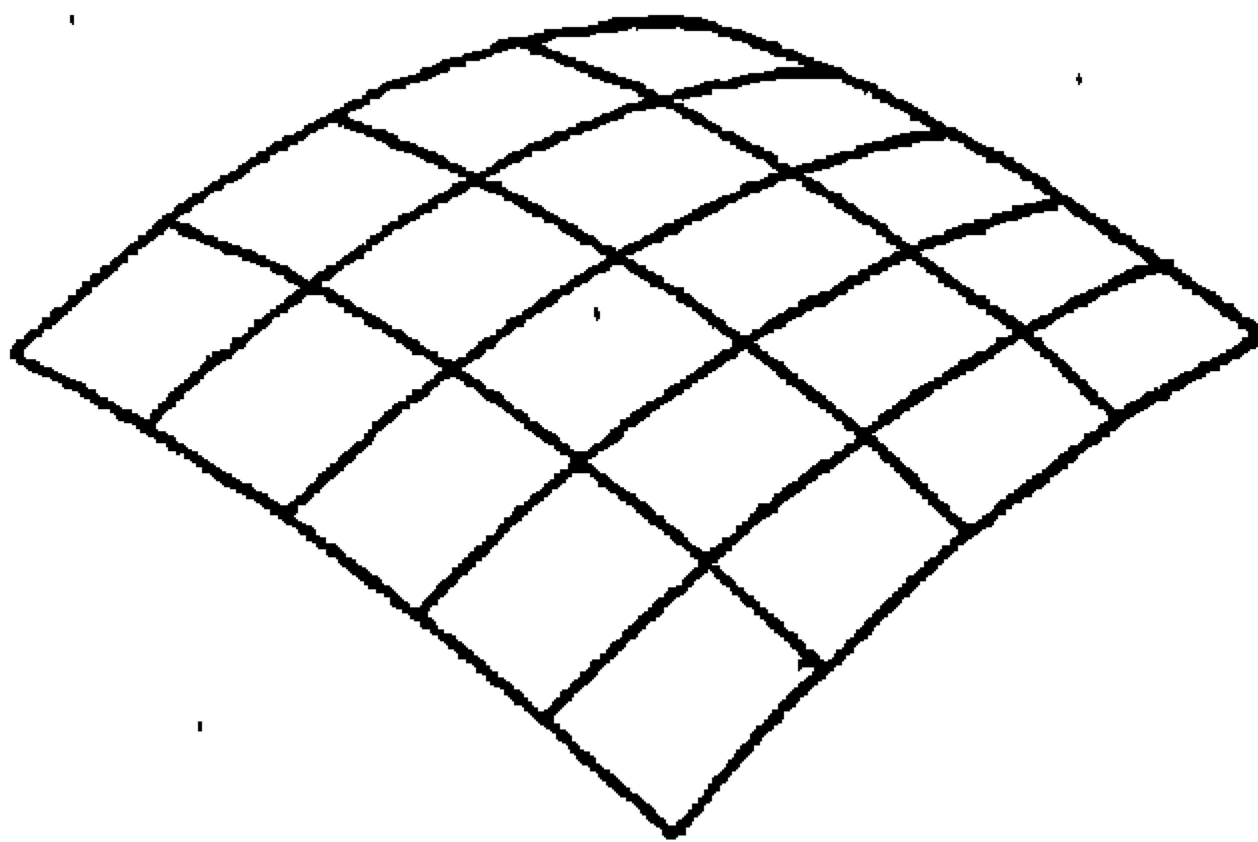
ولكنني أعتقد أن هناك مجالا غريباً للجاذبية يؤثر على القرص ويعتبر مسئولا عن ظهور هاتين الظاهرتين ، وبسبب اتجاه مجال الجاذبية إلى خارج القرص تغيراً فى شكل القضبان المماسكة ويؤثر على نظام توقيت الساعات التى أستخدمها . وإنى أعتقد أن مجال الجاذبية والهندسة غير الأقليدية والساعات ذات التوقيت المختلف كلها مرتبطة ببعضها ارتباطاً وثيقاً . ولكى تصبح مجموعتى الإحداثيه مقبولة يجب علىّ فى نفس الوقت أن أفرض وجود مجال مناسب للجاذبية ذى تأثير على القضبان المماسكة والساعات .

« ه » : ولكن هل أنت متنبه إلى الصعوبات المتسببة عن نظريتك العامة للنسبية ؟ ولكى أوضح ما أرمى إليه سأسوق مثالاً لا يمت بصلة إلى علم الطبيعة . لنتصور مدينة أمريكية مثالية تتكون من شوارع متوازية وأخرى عمودية عليها ، مع فرض أن المسافة بين كل شارعين واحدة فى جميع الحالات . وإذن تكون مجموعات المبانى متماثلة دائماً فى الشكل . وبهذه الطريقة يمكننى بسهولة تمييز موقع أى مجموعة من مجموعات المبانى ، ولكن مثل هذا النظام سيكون مستحيلا بدون هندسة إقليدس . فمثلا لا يمكننى تقسيم سطح الأرض كله بنفس الطريقة التي قسمنا بها مساحة المدينة الأمريكية . ونظرة واحدة إلى خريطة العالم تقنعنا بهذا . وكذلك لا يمكننا تقسيم القرص الذى نعيش عليه بنفس الطريقة . وأنت تدعى أن مجال الجاذبية يؤثر على أبعاد قضبانك ، ولا شك أن عجزك عن إثبات نظرية إقليدس الخاصة بتساوى نسبة أنصاف الأقطار ومحيطات الدوائر ليثبت لك بوضوح أنك إذا قمت بمثل هذا التقسيم للشوارع فإنك ستقابل إن آجلا أو عاجلا صعاباً كثيرة وستجد أن مثل هذا العمل لا يمكن القيام به على سطح القرص . والهندسة التى نتبعها على قرصك الدائر تشبه هندسة السطح المنحنى حيث لا يمكننا إقامة مثل هذا النظام على بقعة كبيرة من السطح . ولذكر مثال ذى صلة بعلم الطبيعة سنعتبر مستوى يسخن بغير انتظام فى نقط مختلفة من سطحه . فهل يمكنك بواسطة استخدام قضبان حديدية صغيرة متمددة فى الطول بتأثير الحرارة ، إتمام عملية تقسيم المستوى إلى شوارع متوازية وأخرى متعامدة كالمرسومة فى الشكل



المرفق ؟ بالطبع لا ! إن مجال الجاذبية الذى تفرضه يؤثر على قضبانك كتأثير التغير فى درجة الحرارة على القضبان الحديدية الصغيرة .

« ع » : كل هذا لا يروعنى . إن الغرض من نظام الشوارع المتوازية والمتعامدة كان لتعيين أماكن النقط ، وتستخدم الساعة لتنظيم وقوع الأحداث ولا يلزم أن تكون المدينة أمريكية ، بل قد تكون مدينة أوربية قديمة . لنفرض أن مدينتنا المثالية قد صنعت من الصلصال ثم غيرت أشكالها بعد ذلك . سأستطيع مع ذلك أن أتذكر مجموعات المنازل والشوارع المتوازية والأخرى المتعامدة على الرغم من أنها لم تعد متوازية وعلى أبعاد متساوية من بعضها . وبالمثل ترمز خطوط الطول والعرض على سطح أرضنا إلى أوضاع النقط رغماً عن عدم وجود « نظام تقسيم المدينة الأمريكية » .



« ن » : ما زالت هناك صعوبة . فأنت مضطر دائماً إلى إلى استخدام « نظام المدينة الأوربية » ، وأنا أوافقك على أنه يمكنك تنظيم النقط أو الأحداث ، ولكن هذا التنظيم سيحدث اضطراباً فى جميع قياسات المسافات ، ولن يعطيك الخواص القياسية للعالم كما هى الحالة فى التنظيم الذى سبق أن ذكرته . فمثلا فى مدينتى الأمريكية ، لكى تقطع مسافة متكافئة لعشرة مجموعات بنائية ، يجب أن تسير ضعف مسافة خمسة مجموعات . وحيث أننى أعلم أن جميع المجموعات متساوية فسأستطيع تعيين المسافات على الفور .

« ع » : هذا صحيح ؛ ففى « نظام مدينتى الأوربية » لا أستطيع قياس المسافات فوراً بعدد المجموعات ذات الأشكال المتغيرة . ويجب أن أعرف شيئاً

أكثر ، يجب أن أعرف الخواص الهندسية للسطح . فكما نعرف أن المسافة عند خط الاستواء بين خطى الطول ٠° ، ١٠° لا تساوى المسافة بين ٠° ، ١٠° عند القطب الشمالى ، فإنه فى استطاعة كل بحار أن يعرف المسافة بين مثل هاتين النقطتين على سطح الأرض لأنه يعرف خواصها الهندسية . ويمكنه عمل ذلك إما بطريق الحساب المبنى على أساس معرفته لحساب المثلثات الكرى أو عملياً بقياس المسافة بواسطة تحريك سفينته بسرعة ثابتة فى كلا المسافتين . أما فى حالتك فالمسألة جد بسيطة ، لأن كل الشوارع تبعد عن بعضها بنفس المسافة . والأمر أكثر تعقيداً على سطح الأرض لأن خطى الزوال ٠° ، ١٠° يتقابلان عند قطب الأرض الشمالى ، وتبلغ المسافة بينهما نهايتها العظمى عند خط الاستواء . وبالمثل فى حالة « نظام مدينتى الأوربية » يجب أن أعرف شيئاً أكثر مما نعرفه فى حالة مدينتك الأمريكية » لكى أقدر المسافات . ويمكننى معرفة هذه المعلومات الإضافية بدراسة الخواص الهندسية لعالمى فى كل حالة خاصة .

« ﻫ » : ولكن هذا كله يهدف إلى إظهار الصعوبات والتعقيدات التى تنشأ عند نبذ النظام البسيط الناتج عن هندسة إقليدس ، واتباع نظام السقالة المعقد الذى لابد لك من استخدامه . فهل هناك ضرورة لذلك ؟

« ح » : نعم لا مفر من ذلك ، إذا أردنا تطبيق علم الطبيعة على أية مجموعة إحداثية ، دون الإشارة إلى المجموعة الإحداثية القاصرة المبهمة . وأنا أوافقك على أن وسائلى الرياضية أكثر تعقيداً من وسائلك ، ولكن فروضى الطبيعية أكثر بساطة وأقرب إلى الطبيعة من فروضك .

وقد انحصرت دراستنا حتى الآن فى العالم ذى البعدين . ويتركز اهتمام النظرية العامة للنسبية فى عالم أكثر تعقيداً ، هو عالم الزمان والمكان ذو الأربعة الأبعاد . ولكن الآراء والمعتقدات هى نفسها التى ذكرناها فى حالة البعدين . ولا يمكننا استخدام « السقالة الميكانيكية » ذات القضبان المتوازية والمتعامدة والساعات المضبوطة فى نظرية النسبية العامة ، كما فى نظرية النسبية الخاصة . وفى أية مجموعة إحداثية لا يمكننا تعيين النقطة واللحظة اللتين يقع عندها الحدث ، باستخدام

قضبان متماسكة وساعات مضبوطة ذات نظام توقيت موحد ، كما هى الحال فى المجموعة الإحداثيــة القاصرة المفروضة فى نظرية النسبية الخاصة . ولـكن يمكننا تنظيم الأحداث بواسطة قضباننا غير الإقليدية وساعاتنا ذات التوقيت المختلف . ولـكن القياسات الفعلية التى تحتاج إلى قضبان متماسكة وساعات مضبوطة ذات نظام توقيت موحد ، يمكن عملها فقط فى المجموعات الإحداثية القاصرة المحلية . وتتحقق نظرية النسبية الخاصة فى هذه المجموعات الأخيرة ، ولـكن مجموعتنا الإحداثية الصحيحة محلية فقط وخواصها القاصرة محدودة فى المـكان والزمان . ويمكننا التنبؤ فى أية مجموعة إحداثية بنتائج القياسات التى نقوم بها فى المجموعة الإحداثية القاصرة . ولعمل ذلك يجب أن نعرف الخواص الهندسية لعالمنا المـكانى — الزمانى .

وتوضح لنا تجاربنا المثالية فقط الخواص العامة لعلم الطبيعة النسبى الحديث ، وتظهر لنا هذه التجارب أن موضوعنا الرئيسى هو الجاذبية ، وأن النظرية العامة للنسبية تؤدى إلى تعميم أكبر لمعتقدات المـكان والزمان .

النسبية العامة وتحقيقها :

تحاول النظرية العامة للنسبية صياغة القوانين الطبيعية لـكى تتحقق فى جميع المجموعات الإحداثية . والموضوع الأساسى للنظرية هو الجاذبية . وتبذل النظرية أول محاولة جدية — منــذ عهد نيوتن — لصياغة قانون الجاذبية ، فهل هذا ضرورى ، مع ما نلمسه من انتصارات نظرية نيوتن والتقدم الـكبير فى علم الفلك المبنى على أساس قانون نيوتن للجاذبية ؟ ومع أن هذا القانون ما يزال يعتبر حتى الآن أساساً لـكل الحسابات الفلـكية . ومن ناحية أخرى لا تخفى علينا الاعتراضات على هذه النظرية القديمة .

ويتحقق قانون نيوتن فقط فى المجموعــة الإحداثية القاصرة لعـلم الطبيعة الـكلاسيكى ، أى فى المجموعات الإحداثية التى يشترط فيها — كما نذكر — تحقيق قوانين الميكانيكا . وتتوقف القوة الموجودة بين كتلتين على المسافة الموجودة بينهما . والعلاقة الموجودة بين القوة والمسافة هى كما نعلم لازمة — أى لا تتغير — بالنسبة

للتحويلات الـكلاسيكية . ولـكن هذا القانون لايتفق ونظرية النسبية الخاصة . فليست المسافة لازمة بالنسبة لتحويلات لورنتز . ويمكننا أن نحاول — كما فعلنا بنجاح فى حالة قوانين الحركة — تعميم قانون الجاذبية لـكى نجعله يتفق مع نظرية النسبية الخاصة أو بعبارة أخرى نصوغه بحيث يكون لازماً بالنسبة لتحويلات لورنتز ، لا بالنسبة للتحويلات الـكلاسيكية . ولـكن قانون نيوتن للجاذبية قاوم بعناد جميع الجهود التى بذلت لتبسيطه وجعله متمشياً مع نظرية النسبية الخاصة . وحتى إذا فرضنا نجاحنا فى ذلك فإن هناك خطوة أخرى ضرورية لا بد منها : هى الانتقال من المجموعة الإحداثية الاختيارية إلى نظرية النسبية العامة . ومن جهة أخرى فإننا نرى بوضوح من التجارب الثالية المتعلقة بالمصعد الساقط أنه لا مندوحة لنا من حل مشكلة الجاذبية لـكى نتمكن من صياغة نظرية النسبية العامة . ويتضح لنا من دراستنا سبب اختلاف حل موضوع الجاذبية فى علم الطبيعة الـكلاسيكى عنه فى النسبية العامة .

وقد حاولنا إيضاح الطريق المؤدى إلى النظرية العامة للنسبية والأسباب التى تدفعنا مرة أخرى إلى تغيير آرائنا القديمـة . وسنحاول — دون أن ندخل فى تفاصيل التركيب الرياضى للنظرية — إظهار بعض خصائص لنظرية الجاذبية الجديدة تميزها عن النظرية القديمة . ولن يكون من العسير علينا التنبه إلى طبيعة هذه الفروق نظراً لما سبق لنا إيضاحه :

١ — يمكن تطبيق معادلات الجاذبية لنظرية النسبية العامة فى أى مجموعة إحداثية . وسيكون لأى شخص حرية اختيار المجموعة الإحداثية المناسبة فى أى مسألة خاصة . وستكون كل المجموعات الإحداثية شكلياً سواء فى نظرنا . وبإهمال الجاذبية نرجع أوتوماتيكياً إلى المجموعة الإحداثية القاصرة فى النظرية النسبية الخاصة .

٢ — يربط قانون نيوتن للجاذبية بين حركة جسم فى لحظة ما بمكان معين وبين فعل جسم آخر فى نفس اللحظة على مسافة بعيدة من الجسم الأول . وهذا

هو القانون الذى وضع لنا أساس نظريتنا الميكانيكية كلها . ولكن النظرية الميكانيكية قد انهارت ، ولسنا فى قوانين ماكسويل نظاماً جديداً لقوانين الطبيعة . ومعادلات ماكسويل هى قوانين بنائية ، إذ أنها تربط الأحداث التى تقع الآن فى مكان ما بتلك التى ستحدث بعد فترة وجيزة فى نقطة قريبة . وهى تؤدى إلى القوانين التى تصف التغيرات فى المجال الكهرومغناطيسى . ومعادلات الجاذبية الجديدة هى أيضاً معادلات بنائية تصف التغيرات فى مجال الجاذبية . ويمكننا القول بأن الانتقال من قانون نيوتن للجاذبية إلى النسبية العامة يشبه لحد ما الانتقال من الموائع الكهربائية وقانون كولوم إلى نظرية ماكسويل .

(٣) وليس عالمنا إقليدياً ، وتتكيف طبيعته الهندسية بالكتل الموجودة وسرعها . وتحاول معادلات الجاذبيـة فى نظرية النسبية العامة إظهار الخواص الهندسية للعالم .

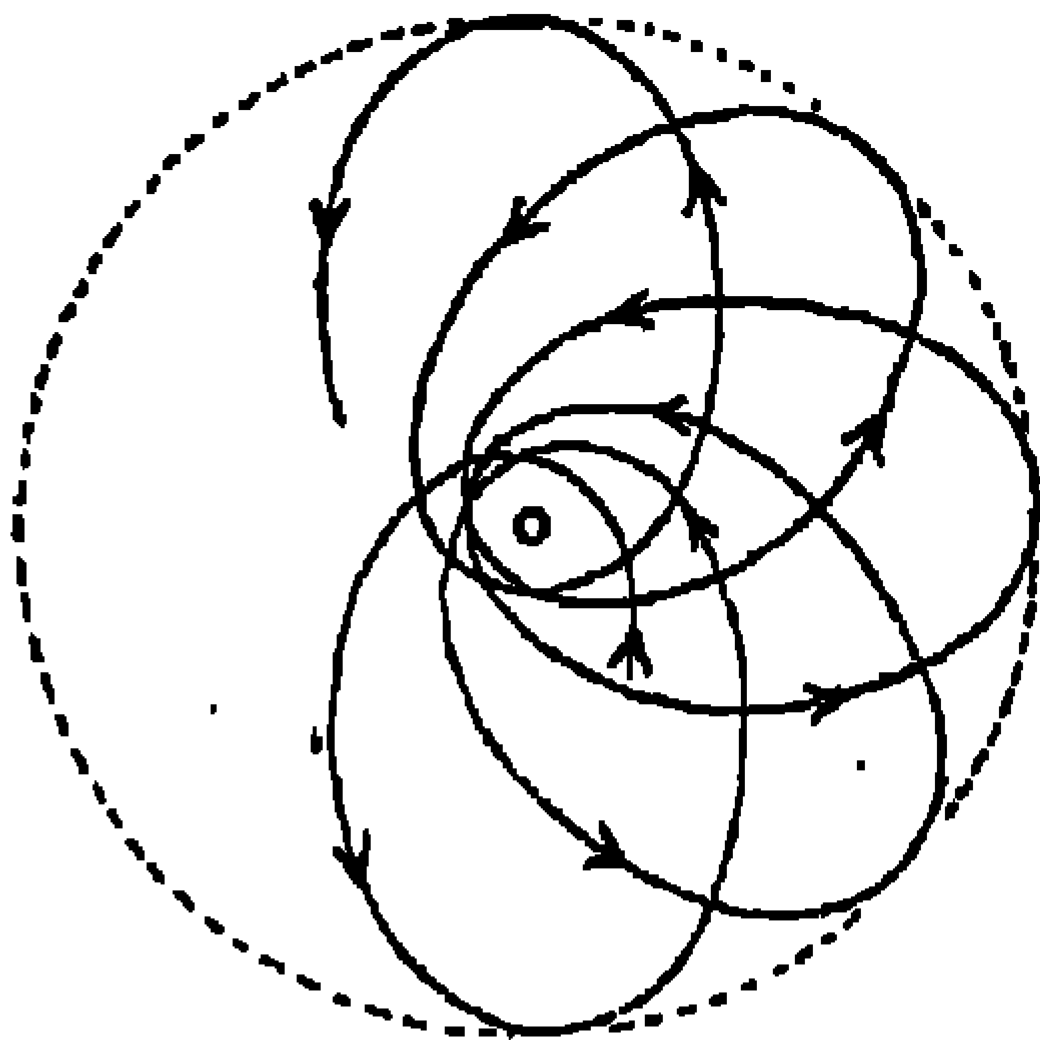
ولنفرض الآن أننا نجحنا فى إتمام برنامج نظرية النسبية العامة . ولكن ألسنا فى خطر الحصول على استنتاجات قد تكون بعيدة عن الحقيقة ، ونحن نعلم أن النظرية القديمة تشرح تماماً المشاهدات الفلكية ؟ هل يمكننا مطابقـة النظرية الجديدة بالمشاهدات العملية ؟ ويجب تحقيق كل نتائج نظرية النسبية عملياً ، ونبذ أى نتائج — مهما كانت شيقة وجذابة — إذا كانت تتعارض مع الحقائق العملية . وماذا كانت نتيجة مقارنة نظرية الجاذبية الجديدة بالحقائق العملية ؟ يمكننا الإجابة على هذا السؤال بعبارة واحدة : النظرية القديمة هى حالة خاصة نهائية للنظرية الجديدة . فإذا كانت القوى الجاذبيـة ضعيفة نسبياً ، فإن قانون نيوتن القديم يصبح قريباً جداً من قانون الجاذبيـة الجديد . وإذن ينتج أن النتائج التى تؤيد النظرية الكلاسيكية ستؤيد أيضاً النظرية العامة للنسبية . وها نحن قد توصلنا ثانيـة إلى النظرية القديمة عن طريق النظرية الجديدة .

وحتى على فرض عدم وجود مشاهدات إضافية تؤيد النظرية الجديدة ، وإذا كانت شروحها صالحة تماماً مثل القديمة وكان علينا أن نختار بين النظريتين فإنه

يجب علينا بلا شك أن ننحاز إلى جانب النظرية الجديدة . ومعادلات النظرية الجديدة هى أكثر تعقيداً من الوجهة الشكلية ولكن فروضها ، من وجهة نظر الافتراضات الأساسية ، أكثر سهولة . فقد اختفى الشبحان المخيفان : الزمن المطلق والمجموعة القاصرة ؛ ولم نتغاض عن تكافؤ الكتلتين القاصرة والجاذبية ؛ ولن نحتاج إلى فرض بخصوص القوى الجاذبية وتوقفها على المسافة ، ولمعادلات الجاذبيـة شكل القوانين البنائية وهو الشكل المطلوب لجميع القوانين الطبيعية منذ الانتصارات الرائعة لنظرية المجال .

وقد أمكننا الحصول على استنتاجات جديدة من قوانين الجاذبيـة الجديدة ، لايشملها قانون نيوتن للجاذبية . وإحدى هذه الاستنتاجات هى ظاهرة انحناء الأشعة الضوئية فى مجال الجاذبية التى نوهنا عنها فيما سلف . وسنذكر الآن مثالين آخرين .

إذا كانت القوانين القديمة تنتج من الجديدة عند ما تكون القوى الجاذبيـة ضعيفة فإننا يمكننا توقع الانحراف عن قانون نيوتن للجاذبية فقط فى حالة مجالات الجاذبية القوية . لنعتبر مجموعتنا الشمسية مثلا . فالكواكب — بما فيها الأرض — تتحرك فى مسارات حول الشمس على شكل قطاعات ناقصة . وأقرب هذه الكواكب إلى الشمس هو المشترى ، وإذن يكون التجاذب بين الشمس والمشترى أقوى من ذلك الموجود بين الشمس وأى كوكب آخر . لأن بعده أقل من أبعاد الكواكب الأخرى . فإذا كان هناك أمل فى إيجاد انحراف عن قانون نيوتن ، فإن احتمال وجوده يكون أقوى فى حالة المشترى . وينتج من النظرية الكلاسيكيه أن مسار الكوكب المشترى لا يختلف فى شىء عن مسار أى كوكب آخر سوى أنه أكثرها قرباً إلى الشمس أما فى حالة النظرية النسبية العامة ، فيجب أن تكون الحركة مختلفة قليلا . فلن



يتحرك المشترى حول الشمس فى قطع ناقص فقط ، بل إن هذا القطع الناقص نفسه يجب أن يدور ببطء كبير بالنسبة للمجموعة الإحداثية المثبتة فى الشمس . ودوران القطع الناقص هو التأثير الجديد لنظرية النسبية العامة . وتعطينا النظرية مقدار هذه الظاهرة ، ولكى ندرك مقدار صغر هذا التأثير وعدم احتمال استطاعتنا إدراكه فى حالة الكواكب البعيدة عن الشمس يكفى أن نذكر أن دورة خسوف المشترى تستغرق ثلاثة ملايين سنة !

وقد كان انحراف حركة الكوكب المشترى عن القطع الناقص معروفاً قبل نشوء نظرية النسبية العامة ، ولم يتمكن العلماء من وضع شرح له . بل على العكس نشأت النظرية العامة للنسبية دون التنبه إلى هذا الموضوع الخاص ، ولكن فيما بعد ظهرت من معادلات الجاذبية الجديدة ، النتيجة الخاصة بدوران القطع الناقص أثناء حركة كوكب حول الشمس . وقد شرحت النظرية بنجاح انحراف الحركة عن قانون نيوتن فى حالة المشترى .

وما زالت هناك نتيجة أخرى يمكننا استخلاصها من النظرية العامة للنسبية ومقارنتها بالتجربة . سبق أن رأينا أن ساعة موضوعة على الدائرة الكبيرة لقرص دائر تتميز بنظام توقيت مختلف عن نظام الساعة الموضوعة على الدائرة الصغيرة . وبالمثل ينتج من نظرية النسبية أن ساعة موضوعة على الشمس سيكون لها نظام توقيت يختلف عن نظام الساعة الموجودة على سطح الأرض ، لأن تأثير مجال الجاذبية أقوى بكثير على الشمس منه على الأرض .

وقد لاحظنا (فى صفحتى ٧٢ — ٨٣) أن الصوديوم المتوهج يشع ضوءاً أصفر متجانساً ذا طول موجى معين . وتكشف الذرة فى هذا الإشعاع عن ناحية من حركتها الدورية . إذ أن الذرة تمثل ساعة يكون طول الموجة المشعة هو وحدة تقديرها للزمن . وإذن طبقاً لنظرية النسبية العامة يكون الطول الموجى للضوء الصادر من ذرة الصوديوم فى سطح الشمس مثلا ، أكبر قليلا من الطول الموجى الصادر من ذرة الصوديوم الموجودة على سطح الأرض .

ويعتبر تحقيق نتائج النظرية العامة للنسبية بالمشاهدة مسألة معقدة ، وغير منتهية

حتى الآن . وحيث أننا نهتم بالآراء الأساسية فإننا لا ننوى أن نتعمق كثيراً فى هذا الموضوع بل يكفى أن نقول إن حكم التجربة يبدو حتى الآن مؤيداً للنتائج المستخلصة من نظرية النسبية العامة .

المجال والمادة :

رأينا فيما سبق سبب وكيفية فشل وجهة النظر الميكانيكية ، فقد كان من المستحيل شرح جميع الظواهر بفرض وجود قوى بسيطة بين جسيمات لا تتغير . وقد كان التوفيق حليف محاولاتنا الأولى للتعمق إلى أبعد من الوجهة الميكانيكية وكذلك أصابت معتقدات المجال نجاحاً كبيراً فى عالم الظواهر الكهرمغناطيسية ، ثم تمت بعد ذلك صياغة القوانين البنائية للمجال الكهرمغناطيسى ، وهى تربط بين الأحداث القريبة جداً من بعضها فى المكان والزمان . وهذه القوانين تلائم بناء النظرية الخاصة للنسبية حيث أنها لا تتغير بالنسبة لتحويلات لورنتز . وبعد ذلك صاغت النظرية العامة للنسبية قوانين الجاذبية . وهذه أيضاً قوانين بنائية تصف مجال الجاذبية بين الجسيمات المادية . وقد كان من السهل تعميم معادلات ماكسويل بحيث يمكن استخدامها فى أية مجموعة إحداثية ، كما حدث لقوانين الجاذبية فى النظرية العامة للنسبية .

ولدينا حقيقتان : المادة والمجال . وليس هناك أدنى شك فى أننا لا يمكننا أن نتخيل فى الوقت الحاضر أن علم الطبيعة مبنى كله على أساس المادة ، كما فعل علماء الطبيعة فى أوائل القرن التاسع عشر . سنقبل الآن كلا الرأيين مؤقتاً . هل يمكننا أن نعتبر المادة والمجال كحقيقتين متميزتين ومختلفتين ؟ فإذا كان لدينا جسيما صغيراً من المادة فإننا يمكننا البرهنة بطريقة سهلة أن هناك سطحاً خاصاً للجسيم ، لا تكون مادة الجسيم موجودة به ، ولكن تظهر فيه آثار مجال جاذبيته . وخلال دراستنا اعتبرنا أن المنطقة التى تتحقق فيها قوانين المجال تنفصل تماماً بطريقة فجائية عن المنطقة التى توجد بها المادة . ولكن ماهى الخواص الطبيعية التى تميز كلا من المادة والمجال ؟ وقبل أن تظهر النظرية النسبية حاولنا الإجابة على هذا السؤال بالطريقة التالية : تتميز المادة بوجود

كتلة لها فى حين أنه ليست للمجال كتلة . ويمثل المجال طاقة فى حين تمثل المادة كتلة . ولكننا نعرف مما سبق أن مثل هذه الإجابة تعتبر غير كافية بالنسبة للمعلومات الحديثة . تنبئنا نظرية النسبية أن المادة تمثل خزائن كبيرة من الطاقة وأن هذه الطاقة تمثل مادة . ولا يمكننا بهذه الطريقة التمييز ظاهرياً بين المادة والمجال لأن التفرقة بين الكتلة والطاقة ليست ممكنة شكلياً . ويتركز الجزء الأعظم من الطاقة فى المادة ولكن المجال المحيط بالجسم يمثل طاقة أيضاً ولو أنها ذات قدر ضئيل نسبياً — وإذن يمكننا أن نقول : توجد المادة حينما يكون تركيز الطاقة عظيما ، ويوجد المجال عند ما يكون تركيز الطاقة ضئيلا . ولكن إذا كانت الحال كذلك فإن الفرق بين المادة والمجال هومسألة تتوقف على مقدار الكمية الموجودة ، ولا معنى لاعتبار المادة والمجال صورتين مختلفتين كثيراً عن بعضهما . ولا يمكننا أن نتخيل سطحاً معيناً يفصل المجال تماماً عن المادة .

وتنشأ نفس الصعوبة فى حالة الشحنة الكهربائية ومجالها . ويبدو من المستحيل أن نعطى خواصاً شكلية واضحة للتمييز بين المادة والمجال أو الشحنة والمجال . وقوانيننا البنائية أى قوانين ماكسويل وقوانين الجاذبية لا تنطبق على حالات تركيز الطاقة الكبيرة جداً أو عند أماكن وجود مصادر المجال ، أى الشحنات الكهربائية أو المادة . ولكن هل يمكننا تحوير معادلاتنا بحيث تصبح صحيحة فى كل مكان حتى فى المناطق التى تكون فيها الطاقة مركزة جداً ؟

لا يمكننا بناء علم الطبيعة على أساس المادة فقط ، ولكن الانقسام إلى مادة مجال ، بعد إدراك التكافؤ بين الكتلة والطاقة ، يعتبر شيئا مصطنعاً وغير واضح تماماً . فهل يمكننا نبذ فكرة المادة وبناء علم الطبيعة على أساس المجال؟ وأن يكون ما يؤثر على إحساساتنا كمادة ليس فى الحقيقة سوى تركيز عظيم جداً للطاقة فى حيز صغير ؟ ويمكننا اعتبار أن المادة هى تلك المناطق من الفضاء الذى يكون المجال ذا تركيز كبير فيها . ويمكننا بهذه الطريقة تكوين رأى فلسفى جديد ، يهدف إلى شرح جميع أحداث الطبيعة ، بواسطة قوانين بنائية تتحقق دائماً فى كل مكان . ومن وجهة النظر هذه ، يكون « الحجر المقذوف فى الهواء » مجالا متغيراً

ذا شدة كبيرة يتحرك فى الفضاء بسرعة الحجر . ولن يكون هناك مكان فى علم الطبيعة الحديث لـكلا المجال والمادة ، فالمجال هو الحقيقة الوحيدة . وتدفعنا إلى هذا الرأى الانتصارات العظيمة التى أحرزتها معتقدات المجال فى علم الطبيعة وكذلك نجاحنا فى صياغة قوانين الـكهرباء والمغناطيسية والجاذبية على شكل قوانين بنائية ، ثم التكافؤ بين المادة والطاقة . وستكون مشكلتنا الأخيرة هى تحوير قوانين المجال بشكل يجعلها تظل متحققة فى المناطق التى تكون الطاقة فيها مركزة جداً .

ولـكننا لم ننجح حتى الآن فى بلوغ هذا الهدف بطريقة مقبولة ومرضية ، ونترك للمستقبل الحـكم فيما إذا كان فى الإمكان تحقيق هذا الفرض . وحتى الآن يجب أن نستمر فى فرض وجود المادة والمجال فى جميع دراساتنا . وما زالت أمامنا مسائل أساسية . فنحن نعلم أن المادة مكونة من أنواع قليلة فقط من الجسيمات . كيف تتكون المادة فى صورها المختلفة من هذه الجسيمات المختلفة ؟ كيف تتفاعل هذه الجسيمات الصغيرة مع المجال ؟ وللاجابة على هذه الأسئلة وضعت آراء جديدة فى علم الطبيعة هى : معتقدات نظرية الـكم .

تلخيص .

ظهر فى علم الطبيعة أعظم اختراع منذ عهد نيوتن وهو المجال . وقد احتاج العلماء إلى خيال علمى كبير ليدركوا أن المجال (الموجود فى الفراغ بين الشحنات أو الجسيمات) ، وليست الشحنات أو الجسيمات نفسها ، أساسى جداً لوصف الظواهر الطبيعية . وقد نجحت فـكرة المجال نجاحا كبيراً وأدت إلى صياغة معـادلات ماكسويل التى تصف بناء المجـال الـكهرمغناطيسى والتى تتحكم فى الظواهر الـكهربائية والضوئية .

وتنشأ نظرية النسبية من مشاكل المجال . فقد دفعنا التناقض بين النظريات القديمة إلى الحاق أوصاف جديدة لعالم المـكان والزمان الذى تقع فيه جميع أحداث العالم الطبيعى .

وقد تكونت نظرية النسبية على خطوتين ، أدت الأولى منهما إلى مانسميه بالنظرية الخاصة للنسبية التى تنطبق فقط على المجموعات الإحداثية القاصرة أى على المجموعات التى يتحقق فيها قانون القصور الذاتى كما وضعه نيوتن . وتُبنى نظرية النسبية الخاصة على فرضين أساسين وهما أن قوانين الطبيعة واحدة فى جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بانتظام بالنسبة لبعضها ؛ وأن لسرعة الضوء دائماً نفس القيمة . ومن هذه الفروض التى أيدتها التجارب العملية أمكننا استنتاج خواص القضبان والساعات المتحركة ، وتغير أطوالها ونظام توقيتها بالنسبة لسرعتها . وقد غيرت نظرية النسبية قوانين الميكانيكا . فالقوانين القديمة لا تتحقق إذا اقتربت سرعة الجسم المتحرك من سرعة الضوء . وقد أيدت التجربة القوانين الميكانيكية الجديدة لجسم متحرك كما صاغتها النظرية النسبية . وهناك نتيجة أخرى للنظرية الخاصة للنسبية وهى العلاقة بين الكتلة والطاقة . فالكتلة هى الطاقة وللطاقة كتلة . ويتحد قانونا بقاء المادة والطاقة فى قانون واحد فى النظرية النسبية هو قانون بقاء المادة والطاقة معا .

وتذهب النظرية العامة للنسبية إلى أبعد من ذلك فى تحليل خواص عالم المكان والزمان . ولا تنحصر صحة هذه النظرية فى المجموعات الإحداثية القاصرة فقط ، فهى تدرس مشكلة الجاذبية وتضع قوانين بنائية جديدة لمجال الجاذبية . وهى تدفعنا إلى تحليل الدور الذى تلعبه الهندسة فى وصف العالم الطبيعى . وهى تعتبر تساوى كتلة الجاذبية مع الكتلة القاصرة شيئاً أساسياً وليس فقط مجرد صدفة ، كما كانت الحال فى الميكانيكا الكلاسيكية . وتختلف النتائج العملية للنظرية العامة للنسبية اختلافا بسيطاً فقط عن نتائج الميكانيكا الكلاسيكية ، وقد تأيدت هذه النتائج مما أمكننا الحصول عليه من النتائج العملية . ولكن قوة النظرية تكمن فى بساطة فروضها وخلوها من التناقض .

وتؤكد نظرية النسبية أهمية فكرة المجال فى علم الطبيعة . ولكننا لم ننجح بعد فى صياغة علم الطبيعة بأكمله على صورة مجالية صرفة ، ولذا فإنه يجب علينا الآن أن نفرض وجود المجال والمادة على حد سواء .

الباب الرابع

الكمات

[الاتصال وعدم الاتصال — الكمات الأولية للمادة والكهرباء — كمات الضوء — طيف الضوء — موجات المادة — موجات الاحتمال — علم الطبيعة والواقع] .

الاتصال وعدم الاتصال :

لنفرض أن أمامنا خريطة لمدينة نيويورك وضواحيها ودعنا نتساءل عن أى النقط على هذه الخريطة يمكن الوصول إليها بالقطار ؟ ولنسجل هذه النقط على الخريطة بعد العثور عليها فى دليل القطارات . لنغير الآن سؤالنا إلى الصيغة : أى النقط يمكننا الوصول إليها بالسيارة ؟ فإذا رسمنا خطوطا على الخريطة تمثل كل الطرق الممتدة من نيويورك فإننا يمكننا عمليا الوصول بالسيارة إلى أى نقطة على هذه الطرق . وعندنا فى كلتا الحالتين مجموعتان من النقط ؛ فى الحالة الأولى نجد أن النقط تنفصل عن بعضها وتعين محطات السكة الحديدية المختلفة وفى الحالة الثانية نجدها تقع على كل النقط التى تمثل الطرق . وسيكون سؤالنا الثانى عن أبعاد كل من هذه النقط عن نيويورك أو على الأدق عن نقطة محددة فى المدينة . وسيكون لدينا فى الحالة الأولى بضعة أرقام متناسبة مع النقط المحددة على الخريطة . وسنرى أن هذه الأرقام تتغير بغير انتظام ولكن على وثبات أو قفزات محدودة . ويمكننا القول إذن بأن ابعاد الأماكن التى يمكن الوصول إليها بالقطار تتغير بطريقة غير متصلة . أما فى حالة الأماكن التى يمكن الوصول إليها بالسيارة فإن هذه الأبعاد تتغير بكميات يمكن تصغيرها كيفما نريد ، أى أن هذا التغير يمكن أن يحدث بطريقة متصلة ، وأنه يمكن جعل التغير فى المسافة صغيراً فى حالة السيارة . ولكن الحالة ليست كذلك فى حالة القطار .

وقد يحدث لانتاج منجم فحم أن يتغير تغيراً متصلا لأن كية الفحم الناتج فى الإمكان زيادتها أوتقليلها بخطوات صغيرة . ولكن عدد عمال المنجم المستخدمين يتغير تغيراً غير متصل، إذ أنه من اللغو أن نقول « ازداد عدد العمال منذ أمس بمقدار ٣٫٧٨٣ » . وإذا سئل رجل عن مقدار مايحمل من النقود فإنه يمكنه الإجابة بعدد يحتوى على رقمين عشرين . ويمكن تغيير مبلغ من المال على قفزات فقط بطريق غير متصل . فنى أمريكا أصغر وحدة للعملة أو مايمكننا تسميته الكم الأولى للعملة الأمريكية هو سنت واحد . والكم الأولى للعملة الأنجليزية هو الفارذنج وهو يساوى نصف قيمة الكم الأولى الأمريكى . فلدينا الآن إذن مثل لكمين أوليين يمكننا مقارنة قيمتيهما . ونسبة قيمتيهما لها معنى محدد إذ أن أحد الكمين يساوى ضعف قيمة الآخر .

ويمكن القول بأن بعض الكميات تتغير بطريقة متصلة وأخرى تتغير بطريقة غير متصلة ، على خطوات لايمكن تصغيرها . وهذه الكميات غير القابلة للقسمة تسمى بالكمات الأولية للمقادير السابق ذكرها .

ويمكننا أن نزن كيات كبيرة من الرمال ونعتبرها متصلة رغم علمنا بتركيبها المحبب . ولكن إذا أصبحت الرمال ذات قيمة عظيمة واستعملت موازين دقيقة لوزنها فإنه يتحتم علينا أن نعتبر أن الكتلة تتغير بمضاعفات لكمية ثابتة هى الحبة . وبذلك يصبح وزن تلك الحبة هو كمنا الأولى للكتلة . ونرى من هذا كيف أن خاصية التقطع أو الانفصال لكمية ـ كانت لاتزال تعتبر متصلة ـ يمكن تأكيدها بزيادة حساسية مقاييسنا .

وإذا كان علينا أن نصف الفكرة الأساسية لنظرية الكم فى جملة واحدة لوجب علينا أن نقول : إن بعض الكميات الطبيعية التى كانت ماتزال تعتبر متصلة تتكون من كمات أولية .

ومدى الحقائق التى تشملها نظرية الكم فسيح جداً ، وقد أكتشفت هذه الحقائق بواسطة الأجهزة الدقيقة الصنع التى استخدمت فى التجارب الحديثة . ومع أننا لن نستطيع وصف أو حتى مجرد الكلام عن التجارب الأساسية ، فإنه

لامناص لنا من ذكر نتائج هذه التجارب حيث أن هدفنا هو شرح الآراء الأساسية الموجودة فقط .

الكمات الأولية الموجودة للمادة والكهرباء :

تنبئنا نظرية الحركة أن جميع العناصر تتكون من جزيئات . فإذا اعتبرنا أسهل الحالات ، باختيار أخف عنصر وهو الإيدروجين ، فإننا نعلم كيف أدت دراسة «الحركة البراونية» إلى تقدير كتلة جزيء واحد من الإيدروجين (صفحة ٤٧) ، وهي:

٣٣ .. .. و . جرام .

وهذا يدفعنا إلى أن نعتقد أن الكتلة غير متصلة حيث أن كتلة أى كمية من الإيدروجين يمكن أن تتغير فقط بعدد كامل من مقادير صغيرة كل منها يتناسب مع كتلة جزيء الإيدروجين . ولكن العمليات الكيميائية ترينا أن جزيء الإيدروجين يمكن تقسيمه إلى قسمين أو بعبارة أخرى إن جزيء الإيدروجين يتكون من ذرتين . وفى العمليات الكيميائية تلعب الذرة ـ لا الجزيء ـ دور الكم الأولى . وبقسمة العدد السابق على اثنين ، نحصل على كتلة ذرة الإيدروجين وهي حوالى :

١٧ .. .. و . جرام .

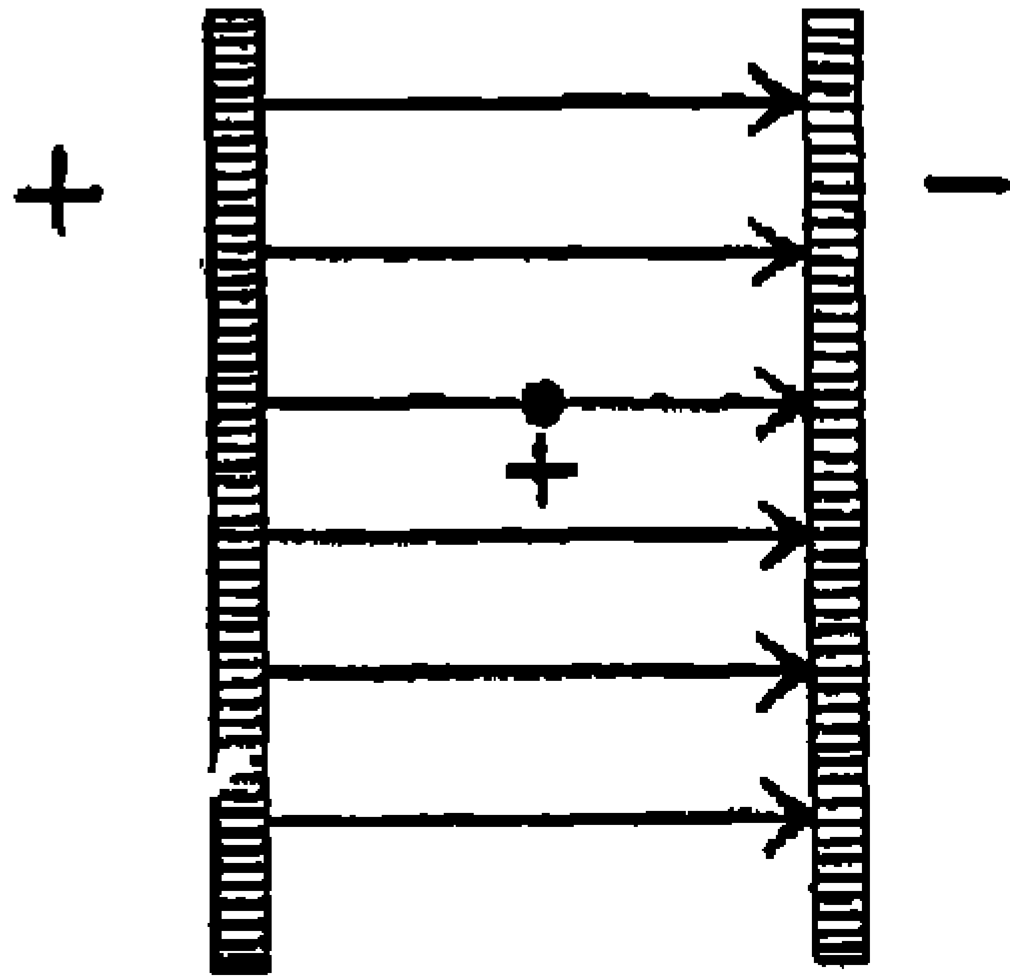
وإذن فالكتلة كمية غير متصلة ؛ ولكننا طبعاً لانعير هذه الحقيقة أى اهتمام عند تقدير الوزن . وحتى أدق المقاييس أبعد ماتكون عن الوصول إلى درجة الدقة اللازمة لاكتشاف عدم الاتصال فى تغير الكتلة .

لنعد الآن للتكلم عن حقيقة مألوفة . لنفرض أن لدينا سلكا متصلا بمصدر تيار كهربائى حيث يسير التيار خلاله من النقطة الأعلا إلى الأقل جهداً . ولعلنا نذكر أن كثيراً من الحقائق العملية قد أمكن تفسيرها بالنظرية البسيطة التى تفرض وجود مائع كهربائى يسير خلال السلك . ولعلنا نذكر أيضاً أن قرارنا (صفحة ٥٧) الخاص بالتساؤل عما إذا كان المائع الموجب يفيض من الجهد المرتفع إلى المنخفض أو أن المائع السالب يفيض من الجهد المنخفض إلى المرتفع كان مجرد اصطلاح . لنترك الآن جانبا كل ما طرأ من تغيير وتحسين كنتيجة لظهور

معتقدات المجال ونقبل جدلا الصورة البسيطة الخاصة بفرض وجود المائع الكهربائى. وحتى عند أخذنا بفكرة الموائع البسيطة فمازال هناك بعض أسئلة تنتظر الجواب. فكما نفهم من اللفظ « مائع » اعتبرت الكهربائية منذ فجر العلم كشيء له صفة الاتصال ، وفى الاستطاعة طبقاً للصور القديمة تغيير كمية الشحنة بمقادير صغيرة اختيارية ولكن لم يكن هناك داع لفرض كمات كهربائية أولية . ثم أدى نجاح نظرية الحركة بعد ذلك إلى أن نتساءل هل توجد كمات أولية للموائع الكهربائية ؟ والسؤال الآخر الذى ما زال ينتظر الجواب هو هل يتكون التيار من فيضان المائع الموجب أو السالب أو كليهما ؟

وللحصول على أجوبة لهذه الأسئلة لا بد من أن نطرد المائع الكهربائى من السلك وندفعه إلى الحركة فى الفضاء ، أى أن نستخلصه من براثن المادة ثم ندرس خواصه التى يجب أن تظهر جلية حينئذ . وقد أجريت تجارب عديدة مثل هذه فى القرن التاسع عشر ، وقبل أن نشرح فكرة إحدى هذه التجارب العملية سنذكر النتائج أولا : يتميز المائع الكهربائى الذى يمر خلال السلك بشحنة سالبة ، وإذن فهو يتجه من النقطة الأقل جهداً إلى الأعلا جهداً . ولو أننا كنا قد توصلنا إلى هذه النتيجة فى بادىء الأمر عند ما كانت نظرية الموائع الكهربائية لاتزال فى طور التكوين لغيرنا بلا شك مصطلحاتنا ، ولسمينا كهربائية القضيب المطاط بالكهربائية الموجبة وكهربائية قضيب الزجاج بالسالبة ، وكان يصبح حينئذ من الأوفق أن نعتبر المائع السالب موجباً . وعلينا الآن أن نتحمل تبعة هذا الخطأ الناتج من عدم إصابة حدسنا . وسؤالنا الثانى المهم هو عما إذا كان تكوين الكهربائية السالبة « محبباً » ، أى عما إذا كانت أو لم تكن مكونة من كمات كهربائية ؟ وقد أثبتت بعض تجارب منفصلة بشكل لا يقبل الشك وجود هذه الوحدة الأولية للكهرباء السالبة . وإذن يتكون المائع الكهربائى السالب من حبيبات ، تماماً ، كما يتكون الشاطىء من حبيبات الرمال ، أو المنزل من اللبنات وتم إثبات ذلك على يدى السير . ج . ج . تومسون منذ أكثر من خمسين عاماً . وتسمى هذه الوحدات الأولية للكهرباء السالبة بالإلكترونات . وإذن تتكون

كل شحنة كهربائية سالبة من عـدد كبير من تلك الشحنات الأولية الممثلة بالالـكترونات (أو الـكهارب) . ويمكن للشحنة السالبة أن تتغير مثل الـكتلة تغيراً غير متصل . وتبلغ الشحنة الـكهربائية حداً من الصغر يجعلنا فى كثير من الأحوال نعتبر الشحنات عموماً — وربمـا يكون ذلك من الأوفق — كميات متصلة ؛ وهكذا أدخلت نظريات الذرة والـكهارب إلى العلوم فـكرة الـكميات الطبيعية غير المتصلة التى يمكن أن تتغير فقط على شكل دفعات .



لنتصور الآن لوحين معدنين متوازيين موضوعين فى مكان مفرغ من الهواء ، يحمل أحدهما شحنة موجبة والآخر شحنة سالبة . فإذا قربنا جسيا صغيراً موجب الشحنة من اللوحين ، فإنه ينجذب إلى اللوح السالب التـكهرب ويطرد بعيداً عن الآخر . وإذن تتجه خطوط القوى الـكهربائية من اللوح السالب إلى اللوح الموجب التـكهرب . وسيكون اتجاه القوة المؤثرة على جسم سالب التـكهرب مضاداً للاتجاه السابق . وإذا كان اللوحان كبيرين بدرجة كافية فإن كثافة هذه الخطوط ستكون موزعة بانتظام بينهما فى كل مكان ، ولن يهمنا أين نضع جسم الاختبار لأن القوة — وبالتالى كثافة هذه الخطوط — ستـكون متماثلة . وإذا وجدت كهارب بين هذين اللوحين فإنها تتحرك مثل حركة نقط المطر فى مجال الأرض المغناطيسى ، أى أنها تتحرك موازية لبعضها متجهة من اللوح السالب إلى اللوح الموجب . وهناك طرق عملية كثيرة لدفع جمع من الالـكترونات إلى مجال يوحد بين اتجاهاتهم . ومن أسهل هذه الطرق إحضار سلك مسخن بين لوحين مشحونين ، لأن خطوط قوى المجال الخارجى توجه الـكهاب المنبعثة من السلك الساخن . وتبنى صمامات الراديو العادية على نفس هذه الفـكرة .

وهناك تجارب رائعـة عديدة سبق إجراؤها على سيال من الـكهاررب ، درست فيها وبحثت بالتفصيل تغيرات اتجاهاتها فى مختلف المجالات الـكهربائية

والمغناطيسية الخارجية ، وأصبح فى الإمكان أيضاً عزل كهرب واحد وتعيين شحنته الأولية ، وكتلته ، أى مقاومته الذاتية لفعل مجال خارجى . وسنذكر هنا فقط كتلة الالكترون ، إذ قد ظهر أنها أصغر من ذرة الإيدروجين عشرين ألف مرة . وهكذا نرى أن كتلة ذرة الإيدروجين الصغيرة تظهر كبيرة بالنسبة لكتلة الكهرب . وتستلزم نظريات المجال الطبيعية أن تكون كتلة الكهرب أو بعبارة أحرى طاقته ناشئة عن طاقة مجاله نفسه ، الذى تبلغ شدته أقصاها داخل كرة صغيرة جداً ، وتصبح مهملة إذا بعدنا عن مركز الكهرب .

وقد سبق لنا أن ذكرنا أن ذرة أى عنصر ما هى إلا أصغر كمّه الأولية . وقد ظل العلماء مدة طويلة مؤمنين بهذا الرأى ، ولكنه الآن أصبح باطلا ، فقد أظهر العلم نظريات حديثة أوضحت بطلان المعتقدات القديمة . ولا يوجد فى علم الطبيعة الآن من النظريات ما هو مبنى على أسس متينة من الحقائق أكثر من تركيب الذرة المعقد . فقد تنبه العلماء أولا إلى أن الكهرب وهو الكم الأولى للكهربائية السالبة ، هو أحد مكونات الذرة ، أى إحدى اللبنات الأولية التى تبنى منها جميع الأجسام . وقد ذكرنا مثال السلك الساخن وانبعاث الكهارب منه ، وليس هذا سوى مثال واحد من أمثلة عديدة لاستخلاص هذه الكهارب من المادة . وهذا المثال — الذى يوضح لنا ارتباط تركيب المادة بتركيب الكهرباء — ظهر على صورة لا تقبل الشك من حقائق عملية كثيرة جداً .

ومن السهل نسبياً استخلاص بعض الكهارب التى تدخل فى تركيب الذرة بالحرارة أو بطريقة أخرى كقذف الذرات بقذائف من كهارب أخرى خارجية . لنفرض أننا أدخلنا سلكا معدنياً لدرجة الاحمرار فى جو من الإيدروجين المخلخل . ستنبعث الكهارب من السلك فى جميع الاتجاهات وتكتسب سرعاً بتأثير مجال كهربائى خارجى . وستزداد سرعة الكهرب تماماً كما يحدث لحجر ساقط فى مجال الجاذبية الأرضية . ويمكننا بهذه الطريقة الحصول على أشعة من الكهارب مندفعة بسرعة معينة فى اتجاه معين ، وقد أصبح الآن فى إمكاننا أن نجعل الكهارب تتحرك بسرع تقترب من سرعة الضوء بتعريضها لتأثير مجال قوى جداً . ماذا يحدث إذن عند ما يسقط شعاع من الكهارب، ذات سرعة معينة ، على جزيئات الإيدروجين

المخلخل ؟ لن يؤدى تصادم كهرب متحرك بسرعة فائقة مع جزىء الإيدروجين إلى انشطاره إلى ذرتين فقط ولكنه سيطرد كهربا آخر من إحدى هاتين الذرتين .

دعنا نسلم بالحقيقة القائلة بأن الكهارب هى بعض مكونات المادة ، وإذن لن تصبح الذرة التى فقدت كهرباً واحداً بلا شحنة كهربائية كما كانت قبل أن تفقد الكهرب . وذلك لأنها فقدت شحنة كهربائية أولية سالبة وإذن يجب أن يحمل ما بقى من الذرة شحنة موجبة . ولما كانت كتلة الكهرب أصغر بكثير جداً من كتلة أخف الذرات فإننا نستطيع القول بأن معظم وزن الذرة ليس ممثلا فى الكهارب ولكن فى الجسيمات الأولية الأخرى المتبقية والتى تفوق كتلتها بكثير كتلة الكهرب ، والتى سنسميها بنواة الذرة .

وقد استحدث علم الطبيعة التجريبية الحديث طرقاً لتحطيم نواة الذرة وتغيير ذرات عنصر ما إلى ذرات عنصر آخر ولاستخلاص الجسيمات الأولية التى تتكون منها النواة ذاتها . وهذا الفصل من علم الطبيعة والمسمى « بطبيعة النواة » والذى قام فيه رذرفورد بدور كبير ، يعتبر شائقاً جداً من الناحية العملية . ولكننا مازلنا حتى الآن فى حاجة إلى نظرية بسيطة فى أسسها تربط بين الحقائق العملية فى عالم الطبيعة النواوية . وبما أننا معنيون فى هذه الصفحات فقط بدراسة المعتقدات الطبيعية العامة فإننا سنترك هذا الفصل رغماً عن أهميته الكبيرة فى علم الطبيعة الحديث .

كمات الضوء :

إذا تصورنا حائطاً مقاماً على طول الشاطىء ، فإن أمواج البحر ستأخذ فى مهاجمة الحائط ملحقة بسطحه بعض البلل ، ثم ما تلبث أن ترتد مفسحة الطريق لأفواج الأمواج القادمة التى ستواصل الهجوم على الحائط مزيلة جزءاً من المصيص الذى يكسى سطحه ، وبذلك يقل وزن الحائط ، ويمكننا أن نتساءل عن القدر الذى ستفقده الحائط فى عام مثلاً . لنتخيل الآن طريقة أخرى لإنقاص وزن الحائط بنفس القدر ، بأن نطلق الرصاص عليها محدثين بها ثقوباً عديدة . سيقل وزن الحائط بهذه الطريقة

كما قل فى الحالة الأولى ؟ ولـكن مظهر الحائط ينبئنا ما إذا كان النقص ناتجاً عن الفعل المستمر لأمواج البحر أم عن سيل الرصاص المتقطع . وسيكون من المفيد لـكى نفهم ماسنتكلم عنه من الظواهر الطبيعية أن ندرك الفرق بين أمواج البحر وسيل الرصاص المنطلق .

سبق أن تـكلمنا عن انطلاق الـكهارب من السلك الساخن . وسنذكر هنا طريقة أخرى لاستخلاص الـكهارب من المعدن بتسليط أشعة متجانسة مثل الأشعة البنفسجية — التى هى عبارة عن أشعة ذات طول موجى معين — على سطحه ، فتنبعث منه الـكهارب بفعل تلك الأشعة التى تقتنصها من المعدن وتبعثها إلى الخارج أفواجاً متتالية متحركة بسرعة معينة . ويمكننا أن نقول من وجهة نظر قاعدة الطاقة ، أن طاقة الضوء تتحول جزئياً إلى طاقة حركة للـكهارب المطرودة . ونستطيع بفضل التجارب العملية الحديثة معرفة هذه الرصاصات وتعيين سرعاتها وبالتالى طاقتها . ويسمى استخلاص الـكهارب بالضـوء الساقط على المعدن : الظاهرة الـكهرضوئية .

وقد استخدمنا فى التجربة السابقة أشعة ضوئية متجانسة ذات شدة معلومة ، ويجب علينا الآن — كما هى العادة فى جميع التجارب العملية — أن نغير ظروف التجربة لنرى ما إذا كان لهذا أثر فى النتائج التى حصلنا عليها .

لنبدأ أولا بتغيير شدة الضوء البنفسجى المتجانس الساقط على لوح معدنى ولندرس الـكيفية التى تتوقف بها طاقة الـكهارب المنبعثة على شدة الضوء الساقط . لنحاول أيضاً أن نعثر على الإجابة عن طريق المنطق العلمى بدلاً من التجربة . يمكننا القـول بأن قسما من طاقة الإشعاع يتحول إلى طاقة حركة للـكهارب فى الظاهرة الـكهرضوئية . فإذا أسقطنا على المعدن أشعة لها نفس طول الموجة ولـكن من مصدر أقوى فإن طاقة الـكهارب المنبعثة ستـكون أكبر لأن الإشعاع سيكون أغنى بالطاقة . وإذن يكون من الطبيعى أن نتوقع ازدياد سرعة الـكهارب المنبعثة بازدياد شدة الضوء . ولـكن عند إجراء هذه التجربة عملياً

حصلنا — لدهشتنا — على نتيجة تتعارض مع استنتاجنا أيضاً . وهكذا نرى أن قوانين الطبيعة لا تسير وفق أهوائنا ، وقد وجدنا الآن تجربة حكمت على الأسس التى بنينا عليها نظريتنا بالفشل ، وكانت نتيجة هذه التجربة مدعاة لأشد العجب من وجهة نظر النظرية الموجية . إذ قد أظهرت أن الكهارب المنبعثة لها نفس السرعة (نفس الطاقة) التى لا تتأثر بزيادة شدة الضوء الساقط ، ولم يكن فى الاستطاعة التنبؤ بهذه النتيجة على أساس النظرية الموجية . وهكذا نرى هنا أيضاً كيف يؤدى التعارض بين إحدى النظريات القديمة والتجربة إلى ظهور نظرية جديدة .

لنتعمد أن نكون ظالمين للنظرية الموجية غامطين لها أفضالها العظيمة ، فنتناس نصرها الشامل فى شرح انحناء الضوء حول العوائق الصغيرة جداً ، ولنحصر الآن اهتمامنا بالظاهرة الكهرضوئية ، ولنحاول إيجاد نظرية تضع لنا شرحا مقبولا لهذه الظاهرة . فمن المقطوع به أننا لا يمكننا أن نستنتج من النظرية الموجبة عدم توقف طاقة الكهارب المطرودة من سطح المعدن على شدة الضوء الساقط . فلنبحث الآن عن نظرية أخرى . لنرجع البصر مرة أخرى إلى نظرية الجسيمات لنيوتن التى نجحت فى شرح كثير من ظواهر الضوء المألوفة وفشلت فى شرح انثناء الأشعة الضوئية . وهى الظاهرة التى سنتعمد عدم ذكرها ونتجاهل نجاح النظرية الموجبة فى هذا الشأن . وفى عهد نيوتن لم تكن حقيقة الطاقة قد وضحت بعد ، فكانت جسيمات الضوء فى رأيه لا وزن لها ، ولكن عندما ظهرت نظريات الطاقة فيما بعد وأدرك الجميع أن للضوء طاقة يحملها معه لم يفكر أحد فى تطبيق هذه المعتقدات على نظرية الجسيمات الضوئية . وبذلك ظلت نظرية نيوتن فى عداد الأموات ولم يفكر أحد جدياً فى بعثها إلى الحياة حتى أوائل قرننا الحالى .

ولكى نحتفظ بالفكرة الأساسية فى نظرية نيوتن يجب أن نفرض أن الضوء المتجانس مكون من حبيبات ضوئية ثم نستبدل بجسيمات الضوء القديمة كمات ضوئية سنطلق عليها اسم الفوتونات — وهى عبارة عن ذرات طاقة صغيرة تتحرك فى الفضاء الخالى بسرعة الضوء . وإحياء نظرية نيوتن على هذه الصورة يؤدى بنا إلى

نظرية الكم للضوء ، فليست المادة والكهرباء فقط بل الطاقة الاشعاعية أيضاً ، تتميز جميعها بتركيب حبيبي ، أى أنها مركبة من كمات ضوئية وبذلك يصبح لدينا كمات طاقة فضلا عن كمات المادة والكهرباء .

وقد كان پلانك أول من استحدث كمات الطاقة فى مستهل القرن الحالى لكى يتمكن من شرح بعض ظواهر طبيعية أكثر تعقيداً من الظاهرة الكهرضوئية . ولكن الظاهرة الكهرضوئية توضح لنا بشكل قاطع وسهل ضرورة تغيير معتقداتنا القديمة .

ولا حاجة بنا لكى نقول أن نظرية الكم للضوء تفسر على الفور الظاهرة الكهرضوئية ، فعند ما يسقط سيل من الفوتونات على سطح معدنى فإن التفاعل بين الأشعة والمادة عبارة عن مجموعة كبيرة جداً من عمليات فردية ، يصطدم فيها الفوتون بالذرة فيقتطع منها كهربا يقذف به إلى الخارج . وحيث أن جميع هذه العمليات الفردية متشابهة فإن جميع الكهارب المنبعثة سيكون لها نفس الطاقة فى كل حالة . وليست زيادة شدة الضوء فى هذه النظرية الجديدة سوى زيادة عدد الفوتونات الساقطة . وينتج عن ذلك طبعاً زيادة عدد الكهارب المنبعثة ولكن يحتفظ كل كهرب بنفس طاقته السابقة دون أن يعتريها أى تغيير . ويثبت لنا هذا أن النظرية الجديدة تتفق تماماً مع التجارب العملية .

ماذا يحدث عند ما تسقط أشعة متجانسة ذات لون آخر ، أحمر مثلاً ، بدلا من البنفسجى على سطح معدنى ؟ لنترك التجارب العملية تتولى الإجابة على هذا السؤال ، ويجب حينئذ أن نقيس طاقة الكهارب المنبعثة ونقارنها بطاقة الكهارب الناتجة من استخدام الضوء البنفسجى . وقد وجد بالتجربة أن طاقة الكهرب المنبعث بفعل الضوء الأحمر أقل من طاقة الكهرب المنبعث بفعل الضوء البنفسجى وهذا يدلنا على أن طاقة كمات الضوء تختلف باختلاف الألوان . فطاقة الفوتونات المكونة للون الأحمر تبلغ نصف طاقة تلك المكونة للون البنفسجى ، أو بعبارة أدق ، تقل طاقة الكمات الضوئية المكونة للون متجانس بازدياد أطوال موجات

الضوء . وهناك فرق أساسى بين كمات الطاقة وكمات الكهرباء ، إذ أن كمات الضوء تختلف باختلاف طول الموجة فى حين أن كمات الكهرباء ثابتة لا تتغير . وإذا كان لابد من استخدام أحد الأمثلة السابقة فيمكننا تشبيه كمات الضوء بأصغر وحدات العملة التى تختلف باختلاف كل دولة .

دعنا نستمر فى تجاهل النظرية الموجبة للضوء ونفرض أن الضوء له تركيب حبيبى ، أى يتكون من كمات ضوئية — فوتونات — تتحرك فى الفضاء بسرعة الضوء . وإذن يأخذ الضوء صورة سيل من الفوتونات أو الكمات الأولية لطاقة الضوء ، وإذا نبذنا النظرية الموجية فإن فكرة الطول الموجى تختفى . ولكن ما الذى يحل محله ؟ هى طاقة كمات الضوء ! وبذلك يمكننا ترجمة العبارات التى تحتوى على مصطلحات النظرية الموجية إلى أخرى تستخدم فيها مصطلحات النظرية الكمية للاشعاع . فمثلا :

فى لغة النظرية الموجية	فى لغة النظرية الكمية
يتميز الضوء المتجانس بطول موجى معين ، فطول موجة الضوء الأحمر الموجود فى نهاية الطيف يبلغ ضعف طول موجة الضوء البنفسجى الموجود فى طرفه الآخر .	يحتوى الضوء المتجانس على فوتونات ذات طاقة معينة ، فطاقة الفوتون المكون للون نهاية الطيف الأحمر تبلغ نصف طاقة ذلك المكون لطرف الطيف البنفسجى .

ويمكننا تلخيص الموقف الحالى كما يلى : هناك من الظواهر الطبيعية ما يمكن شرحها بواسطة النظرية الموجية ، لا بواسطة نظرية الكم كظاهرة انحناء الضوء حول العوائق الصغيرة . وهناك أيضاً بعض ظواهر أخرى مثل انتشار الضوء فى خطوط مستقيمة يمكن شرحها سواء بنظرية الكم أم بالنظرية الموجية .

ولكن ما هى حقيقة الضوء ؟ أهو موجات أم سيل من الفوتونات ؟ . وقد سبق أن وضعنا سؤالا مماثلا لهذا حينما تساءلنا : هل الضوء موجات أم سيل من

جسيمات ضوئية ؟ وكان لدينا حينئذ من الأسباب ما دفعنا إلى نبذ نظرية الجسيمات الضوئية وقبول النظرية الموجية التى شرحت جميع الظواهر الطبيعية . ولكن الموضوع هنا أكثر تعقيداً ، فليس لدينا من الدلائل ما يشير إلى إمكان شرح جميع الظواهر الطبيعية باختيار إحدى هاتين النظريتين . ويبدو لنا أنه لا مفر من استخدام إحدى هاتين النظريتين فى حالات معينة والأخرى فى حالات مختلفة ، واستخدام أى منها فى حالات ثالثة . وها نحن نواجه صعوبة من نوع جديد فلدينا صورتان طبيعيتان متعارضتان لا تكفى إحداها لشرح جميع الظواهر الضوئية ولكنهما معاً تنجحان فى ذلك .

فكيف يمكننا أن نجمع بين هاتين الصورتين ؟ كيف يمكننا فهم هذه الصورة المتعارضة عن طبيعة الضوء ؟ وليس من السهل حل هذه المعضلة ، وها نحن نواجه الآن مرة أخرى معضلة أساسية .

لنفرض الآن أننا نتبع نظرية الفوتونات ولنحاول بمساعدتها أن نفهم الحقائق التى تمكنت النظرية الموجية من شرحها . وبهذه الطريقة سنتكلم عن الصعاب التى تجعل النظريتين يبدوان لأول وهلة كأنهما متنافرتان .

ولعلنا ما زلنا نذكر أن شعاعاً متجانساً من الضوء يمر خلال فتحة صغيرة فى حجم رأس الدبوس يحدث على حاجز صغير حلقات مضيئة ومظلمة على التوالى (صفحة ٨٣) . كيف يمكننا شرح هذه الظاهرة على أساس نظرية الكم الضوئية ، تاركين النظرية الموجية جانباً ؟ لنفرض أن الفوتونات أخذت تمر من الثقب الصغير فيمكننا توقع إضاءة الحاجز الموجود خلف الثقب إذا مرت الفوتونات خلاله أو إظلامه إذا لم تمر . ولكن بدلا ذلك فإننا نشاهد حلقات مضيئة وأخرى معتمة . ويمكننا أن نحاول شرحها كما يلى : يحتمل أن يكون هناك تفاعل ما بين حافة الثقب الصغير والفوتونات مما يتسبب عنه تكون حلقات الحيود . ويصعب علينا قبول هذه العبارة كشرح واف للغرض ، بل إنها ـ على أحسن الفروض ـ قد تصلح لكى تكون أساساً لنظرية مستقبلة لشرح الحيود بتفاعل بين المادة والفوتونات .

وحتى هذا الأمل الضعيف تقضى عليه دراستنا السابقة لمثل عملى آخر . لنفرض

أن لدينا ثقبين صغيرين يمر خلالهما ضوء متجانس فيحدث خطوطاً مضيئة وأخرى معتمة على الحاجز الصغير الواقع خلف الثقبين . كيف نستطيع شرح هذه الظاهرة على أساس نظرية الكم الضوئية ؟ يحتمل أن يمر فوتون من أحد الثقبين ، فإذا كان إحدى فوتونات الأشعة المتجانسة يمثل كما ضوئياً أولياً فإن من العسير علينا تصور انقسامه ومروره من كلا الثقبين . وحتى فى هذه الحالة يجب أن تؤدى الظاهرة إلى تكوين حلقات مضيئة ومعتمة لا إلى خطوط مضيئة وأخرى مظلمة كما يحدث . فكيف أدى وجود الثقب الآخر إلى وجود هذه الظاهرة ؟ لعل الثقب الذى لم يمر الضوء خلاله قد أثر على الحلقات فجعلها خطوطاً ! ! إذا كان الفوتون شبيهاً بالجسيم المادى فى الطبيعة الكلاسيكية فإنه يجب أن يمر خلال أحد الثقبين فقط . وفى هذه الحالة يشق علينا جداً فهم ظاهرة الحيود .

يضطرنا العلم دائماً إلى وضع آراء جديدة ونظريات حديثة لتخطى حواجز التناقضات التى تعترض طريق التقدم العلمى . وقد تولدت الأسس والآراء العلمية من التناحر بين الحقائق ومحاولاتنا لفهمها . وتجابهنا الآن معضلة يلزم لحلها وضع مبادئ جديدة . وقبل أن نذكر محاولات علم الطبيعة الحديث لشرح التناقض بين الصورتين الكمية والموجية للضوء ، سنبين أن هذه المعضلة تعترض طريقنا أيضاً عند دراستنا لكمات المادة بدلا من كمات الضوء .

الطيف الضوئى :

نعلم مما سبق أن جميع المواد الموجودة فى الطبيعة تتكون من بضعة أنواع من الجسيمات الأولية . وقد كانت الكهارب أول ما أكتشف من هذه الجسيمات . ولكن الكهارب هى أيضاً الكمات الأولية للكهرباء السالبة . وقد سبق أن رأينا كيف تضطرنا بعض الظواهر الطبيعية إلى أن نفرض أن الضوء مكون من كمات ضوئية أولية تختلف باختلاف أطوال الموجات . ويجدر بنا قبل أن نسترسل فى دراستنا أن نناقش بعض الظواهر التى تلعب فيها المادة والاشعاع دورين أساسيين .

يمكننا تحليل الأشعة الشمسية إلى مركباتها بواسطة منشور زجاجي ولذا يمكننا الحصول على طيف الشمس المستمر ، وسنحصل بذلك على كل أطوال الأمواج المحصورة بين طرفى الطيف المرئى . لنعتبر مثلا آخر . سبق أن أشرنا إلى أن معدن الصوديوم المتوهج يبعث بإشعاعات متجانسة ، ذات لون واحد أو طول موجى واحد . فإذا وضعنا الصوديوم المتوهج أمام منشور زجاجى فإننا نرى خطاً واحداً ذا لون أصفر . وعلى العموم إذا وضعنا جسما مشعاً أمام منشور فإن الضوء الصادر منه يتحلل إلى مركباته مبيناً خصائص طيف الجسم المشع .

ويؤدى مرور الـكهرباء فى أنبوبة مليئة بالغاز إلى تولد ضوء كالذى نشاهده منبعثاً من أنابيب النيون المستخدمة فى الإعلانات المضيئة . لنضع مثل هـذه الأنبوبة أمام المطياف الذى هو عبارة عن جهاز يقوم بعمل المنشور ولـكنه أكثر حساسية وأعظم دقة فهو يرد الضوء إلى مركباته التى يتكون منها أى يحلله . فإذا نظرنا خلال المطياف إلى أشعة الشمس فإننا نشاهد طيفاً مستمراً تمثل فيـه جميع الأطوال الموجية . أما إذا كان المصدر الضوئى ناشئاً عن مرور تيار كهربائى خلال غاز مخلخل فإن الطيف يصبح ذا خصائص مختلفة فى هذه الحالة . فإننا نشاهد ، بدلا من الطيف المستمر ذى الألوان العديدة الموجودة فى طيف الشمس ، خطوطاً دقيقة مضيئة منفصلة عن بعضها بمناطق مظلمة . ويشير كل خط دقيق إلى لون معين أو إلى طول موجى معين بلغة النظرية الموجية . فإذا شاهدنا عشرين خطاً من خطوط الطيف مثلا فإننا سنرمز لـكل منها برقم يشير إلى طول موجتـه ، فبذلك تتميز أبخرة العناصر المختلفة بمجموعات مختلفة من الخطوط أى بمجموعات مختلفة من الأرقام التى ترمز لأطوال الأمواج المـكونة للطيف الضوئى المشع . ولا يمكن أن يكون لعنصرين نفس مجموعة الخطوط فى طيفيهما المميزين ، كما أنه لا يمكن أن يكون لشخصين نفس بصمات الأصابع . وعندما أخذ علماء الطبيعة فى اكتشاف هذه المجموعات الخطية لجميع العناصر أمكنهم اكتشاف وجود علاقات بين هـذه الخطوط وأصبح بذلك فى الإمكان الاستعاضة بمعادلة رياضية بسيطة عن أعمدة طويلة من الأرقام الدالة على أطوال موجات الطيف المختلفة .

ويمكننا نقل هذا الكلام إلى لغة الفوتونات . فهذه الخطوط تشير إلى أطوال موجات معينة أو بعبارة أخرى إلى فوتونات ذات طاقة محددة . وينتج من ذلك أن الغاز المتوهج لا يرسل فوتونات لها جميع قيم الطاقة الممكنة بل فقط تلك التى لها قيم تميز نفس الغاز المتوهج . وهكذا نرى هنا أيضا كيف تحد الحقائق من كثرة الاحتمالات الممكنة .

فذرات عنصر معين كالإيدروجين مثلا تبعث فوتونات ذات طاقة معينة ، ويسمح لتلك الفوتونات ذات الطاقة المعينة بالإنطلاق بينما يحال دون خروج الفوتونات الأخرى . ولنفرض — بقصد السهولة — أن عنصراً ما أرسل إشعاعات ذات خط طيفى واحد أى فوتونات ذات طاقة معينة . وحيث أن الذرة تفقد جزءاً من طاقتها بالإشعاع فنستطيع بتطبيق قانون الطاقة أن نستنتج أن طاقة الذرة قبل الإشعاع كانت أعلا منها بعده وأن الفرق بين مستويى الطاقة هذين يجب أن يساوى طاقة الفوتون المنبعث . وإذن يمكننا التعبير عما نشاهده من انبعاث أشعة ذات طول موجى واحد أى فوتونات ذات طاقة معينة بالعبارة التالية : يوجد مستوياً طاقة فقط فى كل ذرة من ذرات العنصر ويدلنا انبعاث فوتون من الذرة على انتقالها من مستوى الطاقة المرتفع إلى آخر منخفض .

ولكن يوجد عادة أكثر من خط واحد فى أطياف العناصر ، وإذن تشير الفوتونات المنبعثة إلى وجود مستويات طاقة كثيرة لا واحداً فقط . أو بعبارة أخرى يمكننا أن نفرض أن لكل ذرة مستويات طاقة كثيرة وأن إشعاع فوتون يشير إلى انتقال الذرة من مستو عال إلى آخر منخفض . ومن المهم أن نسلم أنه لا يمكن للذرة أن ترقى إلى كل مستو للطاقة لأننا لا نجد أبداً فوتونات لها جميع قيم الطاقة ، أى أشعة لها جميع الأطوال الموجية فى طيف أى عنصر — فبدلا من أن نقول إن طيف كل ذرة يحوى خطوطاً معينة يمكننا القول بأن لكل ذرة مستويات طاقة معينة وأن انبعاث فوتونات الضوء مصحوب دائماً بانتقال الذرة من مستوى طاقة إلى آخر . وتكون مستويات الطاقة عادة منفصلة وغير متصلة . وهذا أيضاً يبين لنا كيف تحد الحقائق الطبيعية من كثرة الاحتمالات العلمية .

وقد كان العالم بوهر أول من علل فى (١٩١٣) سبب ظهور بعض خطوط الطيف دون أخرى فى أطياف العناصر. وقد رسمت نظريته التى وضعت منذ أكثر من أربعين عاماً، صورة للذرة، أمكننا بواسطتها — على الأقل فى الحالات البسيطة — حساب أطياف العناصر. وبذا أصبحت تلك الأرقام التى كانت لا صلة بينها فجأة ترتبط ببعضها أشد ارتباط على ضوء نظرية بوهر.

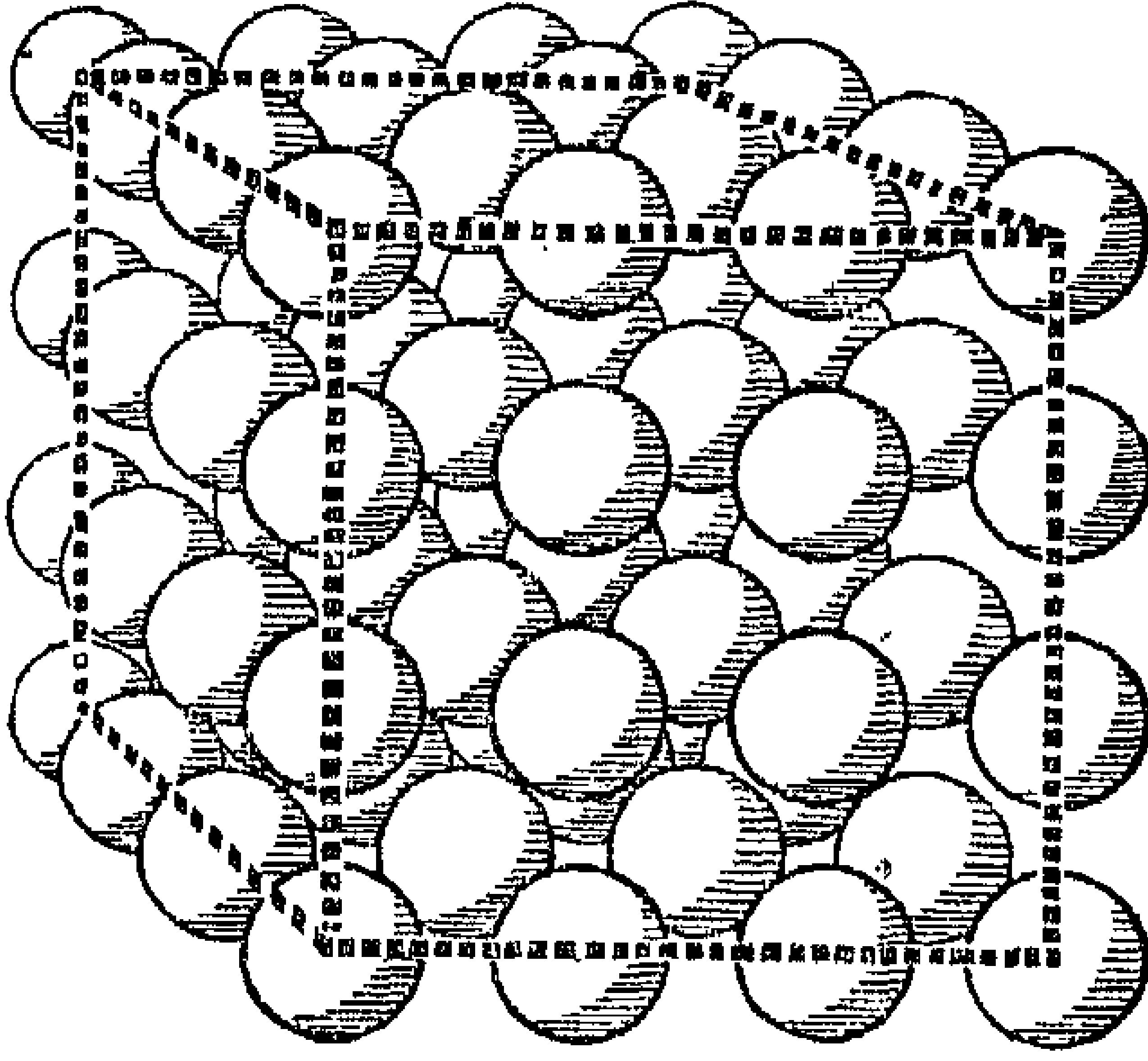
وقد كانت نظرية بوهر طريقاً مؤدياً إلى نظرية أكبر وأدق تسمى بالميكانيكا الموجية أو الكمية. وغرضنا فى هذه الصفحات الأخيرة أن نتفرغ لدراسة معتقدات هذه النظرية الأساسية. وقبل أن نبدأ ذلك يجب علينا أن نذكر نتيجة نظرية وأخرى عملية ذات طابع خاص.

يبدأ الطيف المرئى بطول موجى خاص للون البنفسجى، وينتهى بطول موجى آخر للون الأحمر، أو بعبارة أخرى إن طاقة الفوتونات فى الطيف المرئى دائماً محصورة بين قيمتى طاقتى فوتونات اللونين النفسجى والأحمر. ويرجع السبب فى هذا التحديد طبعاً إلى تحديد قدرة العين الإنسانية. فإذا كان الفرق بين طاقتى مستوى طاقة فى ذرة ما كبيراً جداً فإن الذرة تقذف خارجها إحدى فوتونات الأشعة فوق البنفسجية وهذا يمثل بخط خارج الطيف المرئى. ولا يمكن إدراك هذا الخط بالعين المجردة بل بلوح فوتوغرافى مثلا.

وتتكون أشعة إكس مثلا من فوتونات ذات طاقة أكبر بكثير من فوتونات الطيف المرئى أو بعبارة أخرى تقل أطوال موجاتها آلاف المرات عن أطوال أمواج الضوء المرئى.

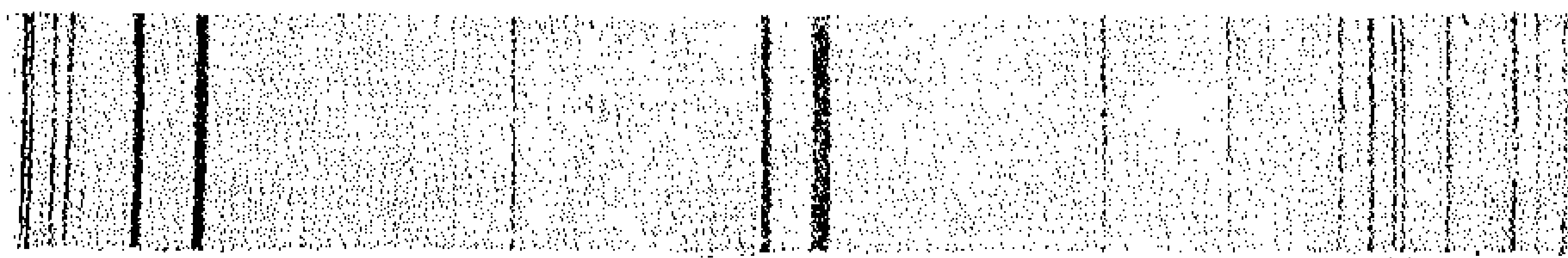
ولكن هل يمكننا عملياً قياس أطوال موجية بهذا القدر من الصغر؟ لقد كان التوصل إلى ذلك غاية فى الصعوبة فى حالة الضوء العادى، إذ كان علينا أن نعد عوايق صغيرة أو ثقوباً دقيقة لكى يمر خلالها الضوء. فالثقبان الدقيقان اللذان كانا فى حجم رأس الدبوس واللذان استخدمناهما لتعيين حيود الضوء العادى يجب أن يزداد حجمهما صغراً ويقل بعدها عن بعض، إذا أردنا مشاهدة حيود الأشعة السينية.

كيف نستطيع إذن قياس أطوال موجات هذه الأشعة ؟ لقد ساعدتنا الطبيعة فى حل هذه المعضلة . تتكون البللورة من مجموعة من الذرات تقع على مسافات صغيرة من بعضها ومرتبة ترتيبا خاصا . يبين لنا الرسم المرفق مثالا بسيطا لتركيب البللورة . فبدلا من الثقوب الدقيقة، تكون الذرات الموجودة فى البللورة عوائق متناهية فى الصغر مرتبة ترتيبا دقيقاً وتقع على مسافات صغيرة من بعضها البعض . وتبلغ المسافات بين الذرات ، حسب نظرية تركيب البللورات حداً من الصغر يجعلنا نتوقع احتمال إحداثها لظاهرة الحيود للأشعة السينية . وقد أثبتت التجربة أن من الممكن حدوث ظاهرة الحيود لأمواج الأشعة السينية أثناء مرورها خلال هذه العوائق المتراصة فى هذا الحجم الصغير أى حجم البللورة .



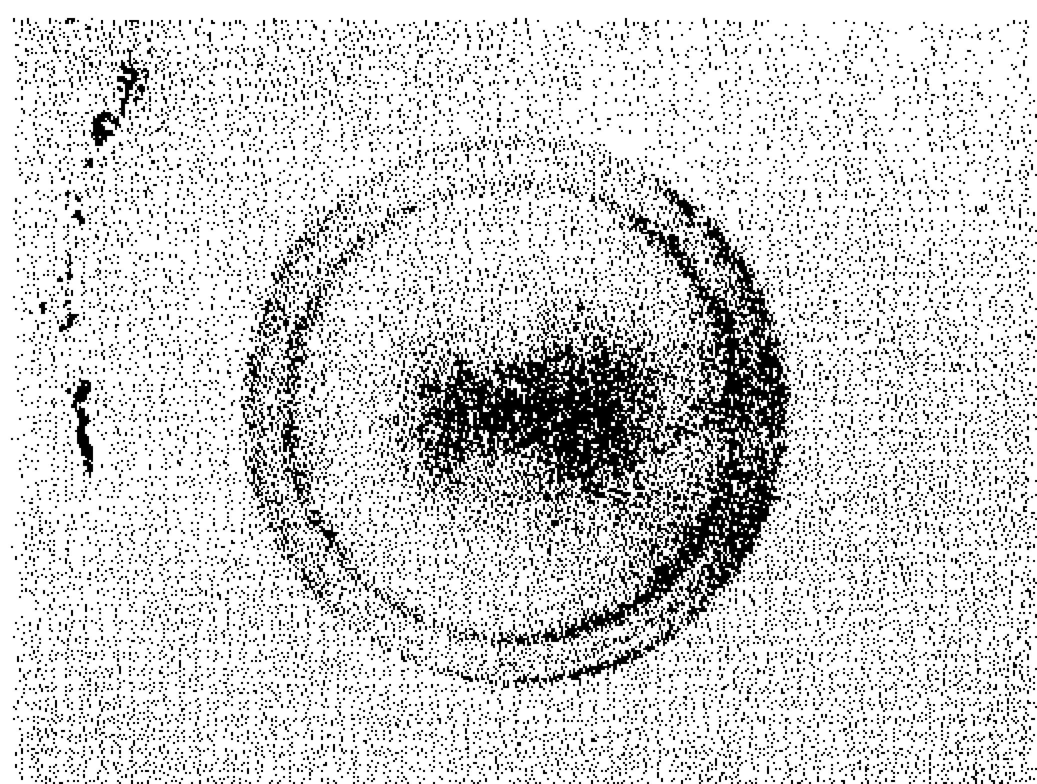
لنفرض أن شعاعا من الأشعة السينية سقط على بللورة ثم بعد ذلك على لوح فوتوغرافى لكى نحصل على أنموذج لظاهرة الحيود . هناك طرق عديدة استخدمت فى دراسة طيف الأشعة السينية واستنتاج أطوال موجاتها من أنموذج الحيود . ويقتضى منا ذكر ذلك كله بالتفصيل مجلدات بأسرها إذا رغبنا فى ذكر كل التفاصيل العملية والنظرية . وفى اللوحة «٣» نرى أنموذج الحيود الذى حصل عليه العلماء باحدى هذه الطرق المختلفة . وهنا أيضاً نرى الحلقات المعتمة والمضيئة المميزة للنظرية الموجية . ونشاهد فى المركز أثر الشعاع الذى لم يعان أى حيود والذى ما كنا نحصل على سواه فى حالة عدم وجود البللورة بين مصدر الأشعة السينية واللوح الفوتوغرافى . ومن مثل هذه الألواح الفوتوغرافية يمكننا تقدير أطوال موجات الأشعة السينية ، وبالعكس إذا علمنا أطوال الموجات أصبح فى استطاعتنا الحصول على معلومات عن تركيب البللورة .

اللوحة الثالثة



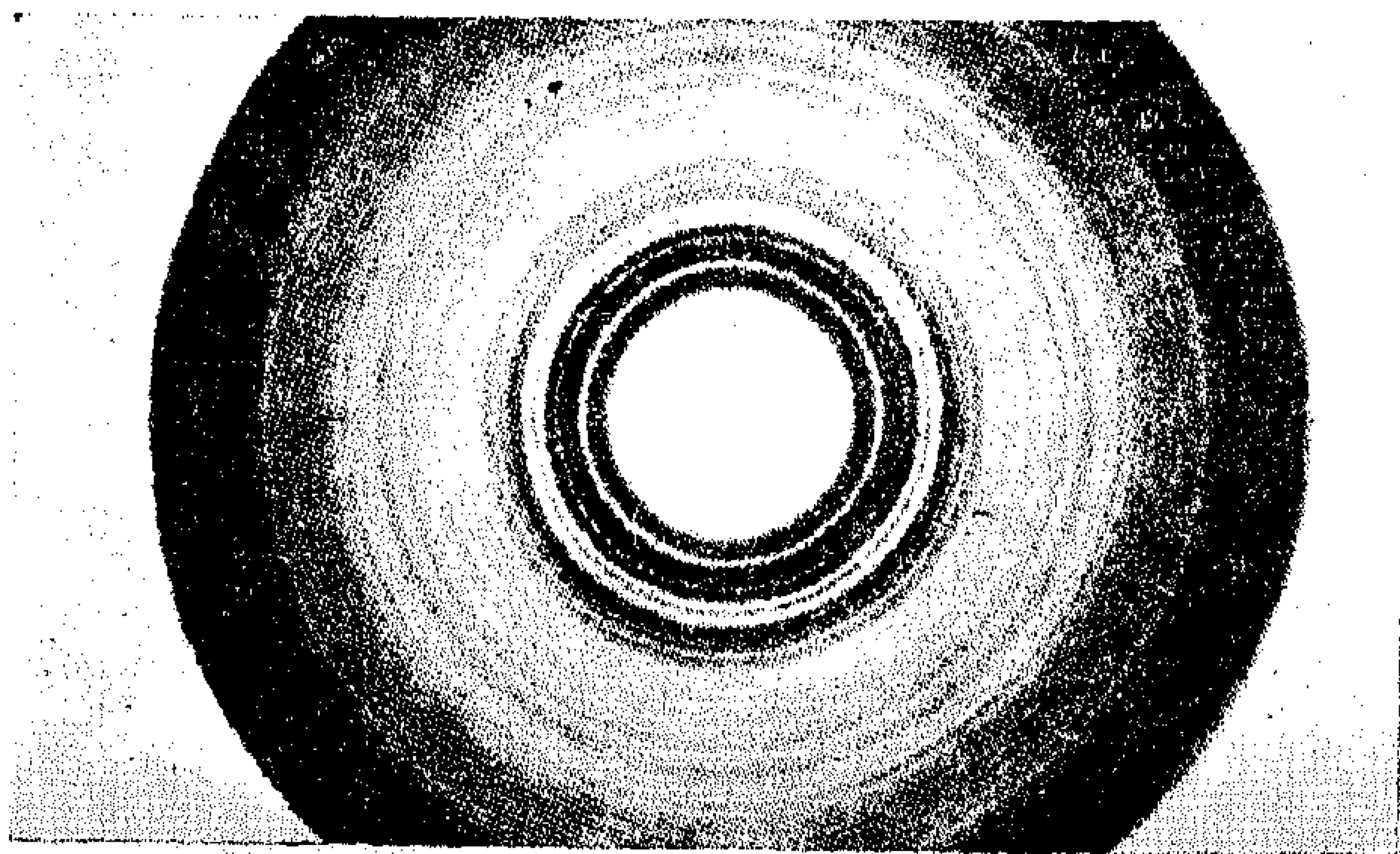
(أخذ الصورة ا . حـ شنستون)

خطوط الطيف



(أخذ الصورة لاستوفيكى وجريجور)

حيود الأشعة السينية

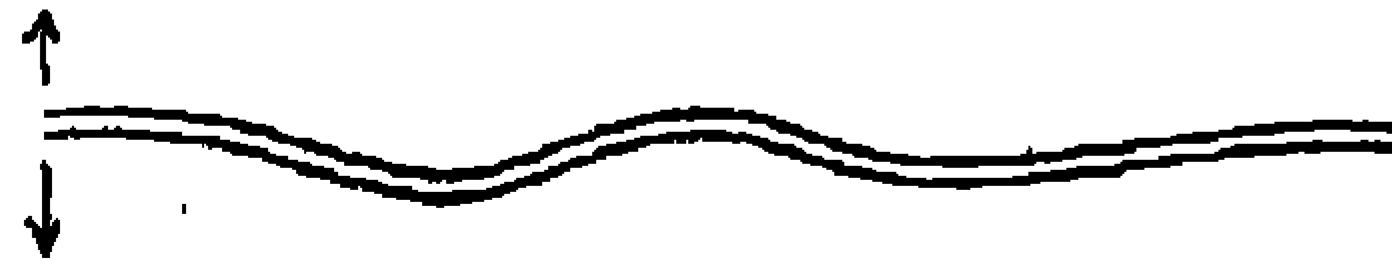


(أخذ الصورة لوريا وكلينجر)

حيود الموجات الكهربية

أمواج المادة :

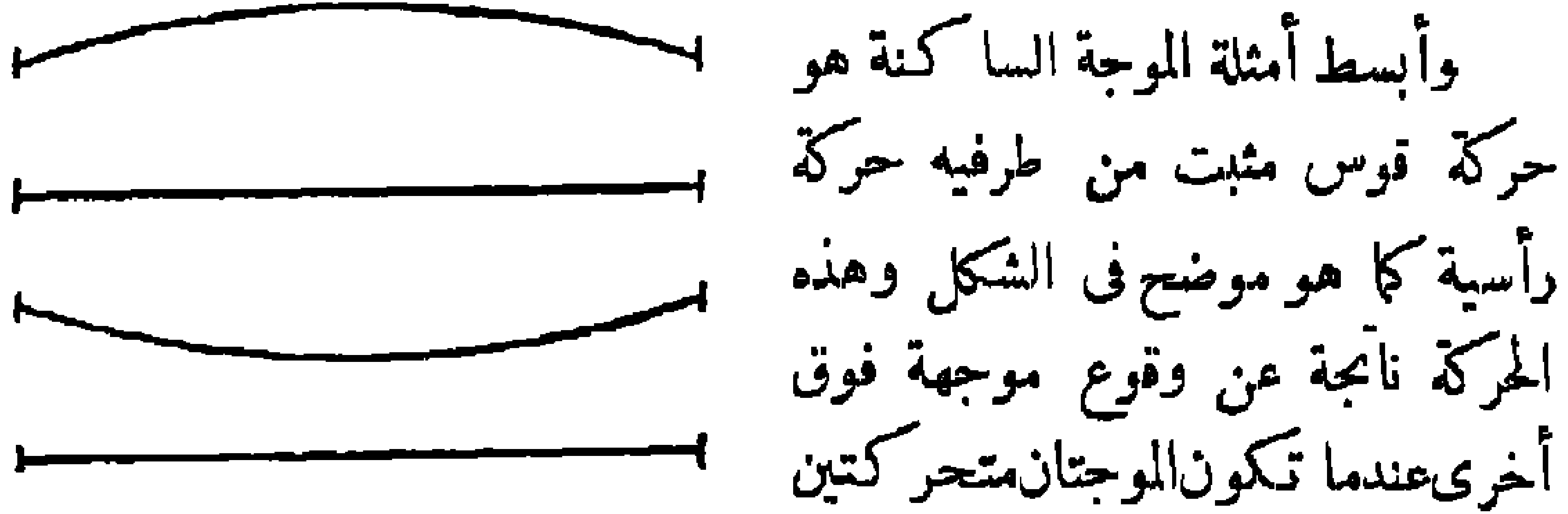
نرجع الآن إلى السؤال : كيف نستطيع فهم وجود بعض أطوال موجات مميزة فى طيف كل عنصر ؟ ما أكثر ما نجد فى علم الطبيعة أمثلة لما يحدث من تقدم أساسى نتيجة لدراسة مقارنات تعقد بين ظواهر لايبدو أن بينها علاقة ما . وقد رأينا فى هذه الصفحات كيف أن معتقدات وضعت وتطورت فى أحد فروع العلم ثم طبقت فى فرع آخر فحازت نجاحا كبيراً . ويعطينا تطور الآراء الميكانيكية والمجالية أمثلة كثيرة فى هذا الصدد . ولعل ربط هذه الموضوعات المحلولة بغيرها التى لم تحل بعد يلقى بعض الضوء على مصاعبنا ويوحى إلينا بآراء جديدة ! فمن السهل العثور على علاقة سطحية لا تغنى شيئاً فى الحقيقة ولكن اكتشاف صفات أو علاقات أساسية مختفية تحت سطح من الاختلافات الظاهرية ثم استخدامها أساساً لنظرية ناجحة عمل جدى بلا شك غاية فى الأهمية . ونشوء ما نسميه بالميكانيكا الموجية وتطورها على أيدى دى بروجلى وشريدنجر منذ أكثر من خمس وعشرين سنة خير مثل لبناء نظرية ناجحة ، على أساس مقارنة بارعة موفقة .



ولنبدأ الآن بمثل كلاسيكى لاعلاقة له بعلم الطبيعة الحديث . لنقبض بأحدى أيدينا على طرف أنبوبة طويلة جداً من المطاط أو سلك حلزونى طويل ونحاول تحريكه بانتظام حركة دورية إلى أعلا وإلى أسفل حتى يتذبذب طرفه . سنرى — كما سبق رؤية ذلك فى أمثلة أخرى — نشوء موجة بسبب هذه الذبذبة وانتشارها خلال الأنبوبة بسرعة معينة . فإذا تصورنا أنبوبة ذات طول لا نهائى فإن أقسام الموجة المبتدئة ستواصل حركتها اللانهائية المستمرة بدون حدوث تداخل .

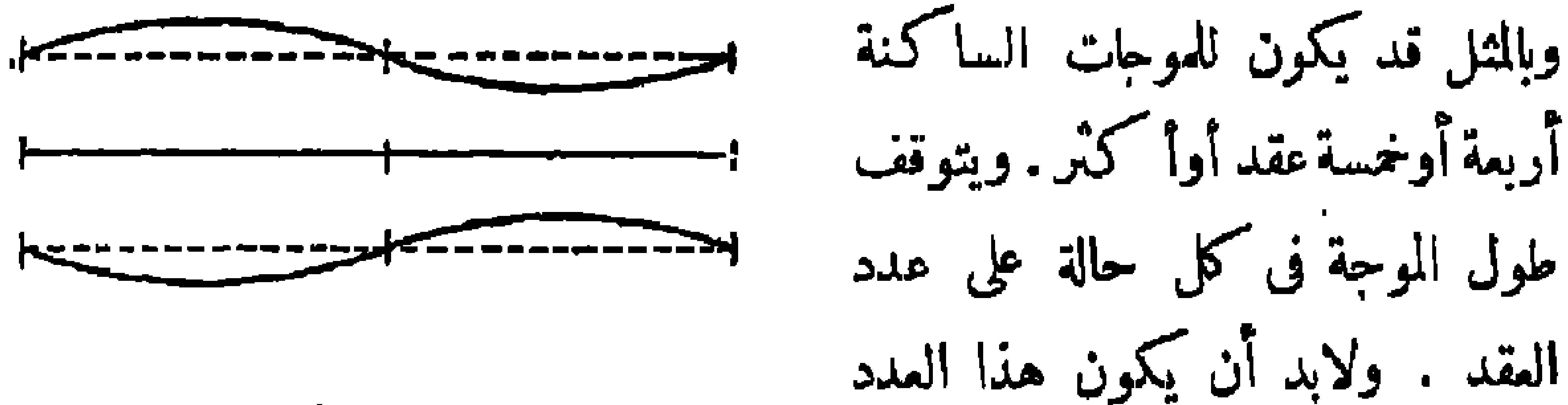
لنعتبر مثلا آخر . لنثبت طرفى هذه الأنبوبة أو لعله من الأفضل أن نعتبر قوس كنجة . ماذا يحدث الآن إذا ماتولدت موجة ماعند أحد طرفى أنبوبة المطاط أو القوس ؟ ستبدأ الموجة رحلتها كما فى المثال السابق ولكنها سرعان ماترتد عند

الطرف الآخر للأنبوبة . وسيكون لدينا بذلك موجتان : إحداهما تولدت من حركة الذبذبة والأخرى بالانعكاس ، وستتحركان فى اتجاهين متضادين ويحدث بينهما تداخل . وليس من العسير علينا تتبع هـذا التداخل واكتشاف الموجة الوحيدة الناتجة من تركيبهما مع بعضهما والتى نسميها بالموجة الساكنة ، ولعل الكلمتين « الموجة والساكنة » تظهران متناقضتين ، ولـكن تركيب هاتين الموجتين مع بعضهما أدى إلى الجمع بين هاتين الـكلمتين .



وأبسط أمثلة الموجة الساكنة هو حركة قوس مثبت من طرفيه حركة رأسية كما هو موضح فى الشكل وهذه الحركة ناتجة عن وقوع موجهة فوق أخرى عندما تكون الموجتان متحركتين فى اتجاهين متضادين . ومن مميزات هذه الحركة ثبوت طرفى السلك ، وتسمى نقطتا الطرفين بالعقدتين . ويمكننا القول بأن الموجة تسكن بين عقدتين بينما تواصل بقية السلك حركتها الرأسية .

ولـكن هـذه أبسط أنواع الموجة الساكنة ، فهناك أخرى ، إذ قد يكون للموجة الساكنة ثلاثة عقد ، اثنان فى طرفى السلك والآخر فى منتصفه . وتـكون لدينا فى هذه الحالة ثلاثة نقط ساكنة . وتكفى نظرة نلقيها على الرسوم الموضحة هنا لتريننا أن طول الموجة هنا يبلغ نصف طولها فى المثال السابق ذى العقدتين .



وبالمثل قد يكون للموجات الساكنة أربعة أو خمسة عقد أو أكثر . ويتوقف طول الموجة فى كل حالة على عدد العقد . ولابد أن يكون هذا العدد صحيحاً وقد يتغير فقط على دفعات ! فعبارة مثل « عدد العقد فى موجة ساكنة هو ٣ر٥٧٦ » مجرد هراء . وإذن يتغير طول الموجة تغيراً متقطعاً . أى أننا فى هذا المثال الـكلاسيكى قد وجدنا إحدى

خصائص نظرية الكم المألوفة . وتزداد الموجة الساكنة التي يحدثها لاعب الكمان تعقيداً ، إذ أنها خليط من موجات عديدة لها ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ عقد ، أي خليط من أطوال موجية كثيرة . وفي استطاعة علم الطبيعة تحليل مثل هذا الخليط إلى مركباته من الأمواج الساكنة البسيطة التي يتكون منها . ويمكننا القول بلغة مصطلحاتنا السابقة أن الوتر المتذبذب له طيف ، تماما كما يتميز كل عنصر بطيفه الإشعاعي . وكذلك أيضاً — كما كانت الحال في أطياف العناصر — لانشاهد في الوتر إلا ذبذبات معينة لايسمح بوجود سواها .

هانحن قد اكتشفنا بعض أوجه شبه بين القوس المتذبذب والذرة المشعة . ومهما بدا من غرابة في هــذا التشابه ، فسنستمر في دراستنا محاولين استنتاج مانستطعه معه وسنمضي قدما في المقارنة . تتكون ذرات كل عنصر من جسيمات أولية إحداها ثقيلة وتسمى بالنواة والأخرى خفيفة وهي الكهارب وتشبه هذه المجموعة آلة صوتية صغيرة تحدث فيها موجات ساكنة .

ومع ذلك فليست الموجة الساكنة سوى نتيجة لتداخل موجتين متحركتين أو أكثر ، فإذا كان في هذه المقارنة بعض الحقيقة فلا بد من وجود صورة أسهل من صورة الذرة لــكي تمثل الموجة المنتشرة . فما هي ياترى أسهل تلك الصور ؟ لايوجد في عالمنا المادي ماهو أسهل من الكهرب الذي لاتؤثر عليه أية قوى أو بعبارة أخرى الكهرب الساكن أو المتحرك حركة منتظمة . ولعلنا نسترسل في تشبيهنا فنمثل الكهرب المتحرك بانتظام بأمواج ذات طول معين . وهذه هي فكرة دي بروجلي الحديثة والجريئة في نفس الوقت .

وقد كان معروفاً قبل ذلك وجود ظواهر تتجلى منها الصفات الموجية للضوء وأخرى تتضح منها الصفات الجسيمية . وبعد أن أخذنا بوجهة النظر الموجية ، وجدنا لدهشتنا أنه في بعض الحالات كحالة الظاهرة الكهرضوئية مثلاً — يسلك الضوء تماما سلوك سيل من الفوتونات . أما في حالة الكهارب لخواصها عكس ذلك تماماً . إذ أننا اعتدنا تشبيه الكهارب بجسيمات هي الكمات الأولية للكهرباء والمـادة . وقد درست شحنتها وكتلتها ، فإذا كان هناك شيء من الحقيقة

فى فكرة دى بروجلى فإنه لابد من وجود بعض ظواهر تتجلى فيها الخواص الموجية للمادة . وهذه النتيجة التى توصلنا إليها عن طريق المشابهة الصوتية تبدو غريبة يصعب تصديقها ، فكيف يمكن أن يكون لجسم متحرك أى صفات موجية ؟ ولكن ليست هذه أول مرة نقابل فيها معضلة من هذا النوع فى علم الطبيعة ، فقد قابلنا نفس المعضلة فى علم الظواهر الضوئية .

تقوم الآراء الأساسية بأهم دور فى تكوين النظريات الطبيعية . وكتب علم الطبيعة ملأى بمعادلات رياضية معقدة . ولكن الآراء والأفكار ـ لا المعادلات ـ هى التى تؤدى إلى ظهور النظريات الطبيعية . ثم تأخذ الآراء والأفكار بعد ذلك الشكل الرياضى المحدد للنظرية ، بحيث يمكن مقارنة نتائجها بالتجربة . ويمكننا إيضاح ذلك بمثل المسألة التى نحن بصددها الآن . فالفكرة الرئيسية هى أن الكهارب المنتظمة الحركة تسلك فى بعض الظواهر المسلك الموجى . لنفرض أن لدينا كهربا أو مجموعة من الكهارب — ذات سرعة واحدة — تتحرك بانتظام . ونحن نعلم قيم كتلة الكهرب وشحنته وسرعته ، فإذا أردنا إلحاق الصفة الموجية للكهرب المنتظم الحركة بكيفية ما ، فإن سؤالنا التالى هو : ما هو طول الموجة ؟ ويتطلب هذا السؤال وضع نظرية تمكننا من تقدير قيمة هذا الطول الموجى الملحق بالكهرب . وهذه مسألة بسيطة ، والسهولة الرياضية لعمل دى بروجلى عند إجابته على هذا السؤال تدعو حقاً إلى العجب . ففى الوقت الذى وضعت فيه هذه النظرية كانت النظريات الطبيعية الأخرى مليئة بالرياضيات الغامضة والمعقدة ؛ أما رياضة الأمواج الملحقة بالمادة فهى غاية فى البساطة ، فى حين أن الفكرة الأساسية آية فى عمق التفكير .

وقد رأينا فى حالة الأمواج الضوئية والفوتونات أنه يمكننا نقل أى عبارة صيغت بلغة الأمواج إلى لغة الفوتونات أو جسيمات الضوء . سنطبق نفس الشىء على الأمواج الكهربية . ولغة الجسيمات مألوفة لنا فى حالة الكهارب المنتظمة الحركة ويمكننا نقل كل عبارة صيغت بلغة الجسيمات إلى اللغة الموجية تماماً كما فى حالة الفوتونات . وقد سهل لنا مهمة هذه الترجمة عاملان : أولهما هو التشابه بين أمواج الضوء وأمواج الكهرب أو بين الفوتونات والكهارب . وسنحاول

استخدام نفس طريقة الترجمة للمادة كما استخدمناها للضوء . وقد أمدتنا نظرية النسبية الخاصة بالدليل الآخر ، فقوانين الطبيعة يجب أن تكون لازمة بالنسبة لتحويلات لورنتز لا بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية . ويمكننا تعيين طول الموجة الملحقة بكهرب متحرك تماماً بواسطة هذين العاملين . فينتج من ذلك أن كهرباً متحركاً بسرعة ١٠ ٠٠٠ ميلاً فى الثانية مثلا له طول موجى ، من السهل تقدير قيمته وقد وجد أنه يقرب من أطوال موجات الأشعة السينية . وإذن نستنتج من ذلك أنه إذا كان إدراك الخواص الموجية للمادة ممكناً فإنه يجب إجراء تجارب مماثلة لتلك التى أجريت على الأشعة السينية .

لنعتبر حزمة أو شعاعاً من الكهارب تتحرك بانتظام بسرعة معينة أى موجة كهربية متجانسة ، إذا استخدمنا المصطلحات الموجية ؛ ولنفرض أنها تسقط على بللورة رقيقة جداً تمثل دور محزوز الحيود . وتبلغ المسافات بين العوائق المسببة للحيود فى البللورة — أى بين الذرات — حداً كبيراً من الصغر يكفى لإحداث الحيود للأشعة السينية . فلعلنا نتوقع ظاهرة مشابهة لتلك عند استعمال الموجات الكهربية ذات الطول الموجى القريب من الأشعة السينية . ويمكن تسجيل حيود هذه الموجات الكهربية عند مرورها خلال الطبقة الرقيقة من البللورات الموجودة فى لوح فوتوغرافى . وفى الحقيقة تظهر هذه التجربة ما يمكننا اعتباره بلاشك نصراً رائعاً للنظرية ، ألا وهو ظاهرة حيود الموجات الكهربية . والتشابه بين حيود الموجات الكهربية والأشعة السينية ملفت للنظر كما يرى من مقارنة النماذج فى اللوحة (٣) . وتمكننا مثل هذه الصور من تقدير أطوال موجات الأشعة السينية . وينطبق نفس الكلام على الموجات الكهربية ، فيعطينا أنموذج الحيود طول الموجة المادية مع التأييد العملى التام للنظرية وفى هذا تأييد شامل لاستنتاجاتنا .

ومع ذلك فهذه النتيجة تزيد فى متاعبنا ! كما يتضح من الحالة المشابهة لذلك فى حالة أمواج الضوء التى سبق ذكرها . فإذا سلط كهرب على ثقب دقيق جداً فإنه سيحيد عن طريقه تماماً كما تفعل موجة ضوئية ، وسنشاهد على اللوح الفوتوغرافى

حلقات مضيئة ومظلمة . وربما كان هناك بعض الأمل فى شرح هذه الظاهرة أيضاً بتفاعل بين الكهرب وحافة الجسم المعترض على الرغم من أن مثل هذا الشرح بعيد الاحتمال . ولكن ماذا عن ثقبي الدبوس المتجاورين ؟ ستظهر خطوط بدلاً من الحلقات . كيف يمكن أن يكون وجود الثقب الآخر سبباً فى إحداث هذا التغيير ؟ فالكهرب لا يمكن شطره وليس له إلا أن يمر خلال أحد الثقبين . كيف يمكن للكهرب أن يعلم أثناء مروره خلال أحد الثقبين أن هناك ثقباً آخراً قريباً منه ؟

وقد سبق أن تساءلنا عن ماهية الضوء ؟ أهو سيل من الجسيمات أم موجة ؟ ويحق لنا الآن أن نسأل ما هى المادة وما هو الكهرب ؟ هل هو جسيم أوموجة ؟ فالكهرب له خواص الجسيم عندما يتحرك فى مجال كهربائى أو مغناطيسى خارجى وله الخواص الموجية عند ما يحيد أثناء مروره خلال بللورة . وقد قابلنا عند دراستنا لكمات المادة الأولية نفس الصعاب التى لاقيناها أثناء دراستنا لكمات الضوء . وبذلك ينشأ الآن السؤال التالى وهو من أهم الأسئلة التى أثارها التطور العلمى الحديث : كيف نجمع بين الرأيين المتعارضين عن المادة والأمواج ، وهذه المعضلة هى من ذلك النوع الذى يؤدى حلها إلى تقدم علمى لا شك فيه . وقد حاول علم الطبيعة الحديث حل هذه المشكلة ؛ والأمر الآن متروك للمستقبل لكى يقرر ماإذا كان هذا الحل الذى اقترحه علم الطبيعة الحديث دائماً أم مؤقتاً فقط !

أمواج الاحتمال :

إذا علمنا موضع نقطة مادية وسرعتها والقوى الخارجية المؤثرة عليها فإننا نستطيع — طبقاً لقواعد الميكانيكا الكلاسيكية — التنبؤ بحركة النقطة المستقبلة بواسطة استخدام القوانين الميكانيكية . والعبارة « للنقطة المادية السرعة كذا عند الموضع كذا فى لحظة ما » لها معنى محدد فى الميكانيكا الكلاسيكية .

وقد حاول العلماء — فى أوائل القرن التاسع عشر — شرح جميع ظواهر علم الطبيعة على أساس الفرض بوجود قوى بسيطة تؤثر على جسيمات مادية ذات

مواضع معينة وسرع معينة عند لحظة ما . لنحاول تذكر كيف وصفنا الحركة عند ما تكلمنا عن الميكانيكا عند بدء استعراضنا لظواهر علم الطبيعة الحديث . فقد رسمنا نقطا على مسار معين كي تحدد لنا أوضاع الجسم عند لحظات معينة ، وكذلك مماسات متجهة كي توضح لنا مقادير واتجاهات السرع . وقد كان هذا كله بسيطاً وسهل الفهم . ولكننا لا نستطيع تطبيق ذلك كله على كمات المادة الأولية (أى الكهارب) أو على كمات الطاقة الأولية (أى الفوتونات) حيث أنه ليس فى الإمكان تمثيل حركة فوتون أو كهرب بالطريقة التى تخيلنا بها الحركة فى الميكانيكا الكلاسيكية ، وليس مثال ثقبى الدبوس عنا ببعيد . ويبدو لنا أن كلا من الفوتون أو الكهرب يمر خلال الثقبين معاً فى نفس الوقت . وبذلك يصبح من المستحيل شرح هذه الظاهرة باعتبار مسار الفوتون أو الكهرب طبقاً للنظرية الكلاسيكية القديمة . وبديهى أنه يجب علينا التسليم بوجود حركات أولية مثل مرور الكهارب والفوتونات خلال الثقوب . وليس هناك شك فى وجود الكمات الأولية للمادة والطاقة ولكن من المؤكد أيضاً أننا لا نستطيع وضع القوانين الأولية على أساس تحديد الأماكن والسرع عند لحظة ما بطريقة الميكانيكا الكلاسيكية السهلة .

لنحاول الآن تجربة أخرى بأن نكرر هذه الحوادث الأولية كأن نرسل الكهارب الواحد تلو الآخر فى اتجاه ثقبى الدبوس الصغيرين . وسيكون استخدام الكلمة « كهرب » على سبيل التحديد فقط فى هذه الحالة ، وينطبق نفس الكلام على الفوتونات .

لنفرض أننا أعدنا هذه التجربة مراراً عديدة بنفس الطريقة أى أن الكهارب تتحرك فى اتجاه ثقبى الدبوس بنفس السرعة الواحد تلو الآخر . وغنى عن الذكر أن هذه التجربة مثالية أى أننا لا يمكننا القيام بها عملياً ولكننا نستطيع تخيلها فقط إذ أنه ليس فى الإمكان إطلاق الكهارب والفوتونات فرادى كما ينطلق الرصاص من البندقية .

ومن الطبيعى أن يؤدى تكرار هذه التجارب إلى الحصول على حلقات

مظلمة وأخرى مضيئة إذا كان لدينا ثقباً واحداً وعلى خطوط مضيئة ومعتمة إذا كان لدينا ثقبان . ولـكن هناك فرق أساسي ، وذلك أنه فى حالة الـكهرب الوحيد كان من العسير علينا تصور نتيجة التجربة فى حين أنه يسهل فهمها إذا تـكررت العملية مراراً ، حيث يمكننا أن نقول الآن : تظهر الخطوط المضيئة عند ما تسقط على أماكنها كهارب كثيرة . أما فى الخطوط المظلمة فيقل عـدد الـكهارب الساقطة كثيراً ، وينعدم سقوط الـكهارب فى المنطقة ذات الظلام الـكامل . وبديهى أننا لانستطيع أن نفرض أن جميع الـكهارب تمر خلال أحد الثقبين فقط لأنه إذا كان ذلك صحيحاً فإن تغطية الثقب الآخر يجب ألا تسبب أى فرق ، ولـكننا نعلم أن تغطية الثقب الثانى يغير فعلا فى نتيجة التجربة . وحيث أن الـكهرب غير قابل للانشطار فإننا لانستطيع تصور مروره من كلا الثقبين فى نفس الوقت . فإذن يمهد لنا تـكرار التجربة مخرجاً من هذا المأزق ، إذ نستطيع القول بأن بعض الـكهارب تمر من أحد الثقبين وتنفذ البقية من الثقب الآخر . ولا يمكننا معرفة سبب تفضيل الـكهارب لثقوب خاصة ، ولـكن يجب أن تكون نتيجة تكرار التجربة اقتسام الثقبين للـكهارب الساقطة من المصدر والمتجهة إلى الحاجز الذى تتكون عليه نماذج الحيود . فإذا ذكرنا فقط مايحدث للـكهارب عند اعادة التجربة ، غير عابئين بسلوك الـكهارب الفردية فإن شرح الفرق بين دوائر الحيود وخطوطه يصبح يسيراً . وهـكذا أدت دراسة سلسلة من التجارب إلى نشوء فـكرة «مجموعة» أو «جمع» من الجسيمات التى لانستطيع التنبؤ بخواصها الفردية . فلا يمكننا مثلا أن نتنبأ بمسار كهرب فردى ، ولـكننا نستطيع أن نتنبأ بنتيجة حركة المجموعة كلها ألا وهى حدوث خطوط مضيئة ومظلمة على الحاجز .

لنترك علم الطبيعة الـكمى جانباً الآن بعض الوقت . لعلنـا نذكر أننا إذا علمنا مكان وسرعة نقطة عادية عند لحظة ما والقوى المؤثرة عليها فى علم الطبيعة الـكلاسيكى فإننا نستطيع التنبؤ بحركة النقطة المستقبلة . وقد رأينا بعد ذلك كيف طبقت وجهة النظر الميكانيكية على نظرية الحركة للمادة ، وكيف أدت دراستنا لهذه النظرية إلى نشوء فـكرة ستـكون ذات فائدة كبيرة لنـا فيما بعـد إذا فهمناها حق الفهم .

لنفرض أن لدينا وعاء به غاز . إذا أردنا تتبع حركة كل جسيم فإن علينا أن نبدأ بإيجاد الظروف الابتدائية أى الأوضاع والسرع الابتدائية لجميع الجسيمات . وحتى إذا فرضنا إمكان ذلك فإن تسجيل النتيجة على الورق تستغرق وقتاً أطول من حياة الإنسان نظراً لضخامة عدد الجسيمات التى علينا أن نعتبرها . وإذا رغبنا بعد ذلك فى استخدام طرق الميكانيكا الكلاسيكية لحساب الأوضاع النهائية للجسيمات فإننا نقابل صعاباً لا يمكننا التغلب عليها . فمن المسلم به مبدئياً أننا نستطيع استخدام الطريقة المتبعة فى دراسة حركة النجوم ولكننا لا نستطيع القيام بها عملياً ، وإذن لا مفر من أن نلجأ إلى الطريقة الإحصائية . وليست هذه الطريقة فى حاجة إلى المعرفة التامة للأحوال الابتدائية ، وبذلك تقل معلوماتنا عن أية مجموعة من جسيمات الغاز عند لحظة ما ويتبع ذلك ضعف قدرتنا على معرفة الأحوال الماضية والمستقبلة للمجموعة . ولن نهتم بمصير كل جسيم على حدة بل ستصبح مسألتنا الآن ذات طبيعة خاصة . فمثلا لن نسأل « ماهى سرعة كل جسم عند هذه اللحظة » ولكن ربما نسأل « كم عدد الجسيمات التى تنحصر سرعتها بين ١٠٠٠ ، ١١٠٠ قدماً فى الثانية » . أى أننا لن نهتم أبداً بالأفراد ولكننا سنحاول فقط تعيين الخواص العامة المجموعة كلها كوحدة . ومن البديهى أن الطريقة الإحصائية لن تصح إلا إذا احتوت المجموعة على عدد كبير جداً من الأفراد .

ولا يمكننا معرفة سلوك فرد داخل مجموعة ما عند استخدام الطريقة الإحصائية بل يمكننا فقط أن نتكلم عن احتمال سلوكها بطريقة معينة . فإذا أخبرتنا القوانين الإحصائية بأن ثلث الجسيمات لها سرعة بين ١٠٠٠ ، ١١٠٠ قدماً فى الثانية فإن هذا يعنى أنه بتكرار عملية القياس على جسيمات كثيرة نحصل على هذا المعدل حقيقة أو بعبارة أخرى أن احتمال وجود جسيم له هذا القدر من السرعة هو $\frac{١}{٣}$.

وبالمثل لكى نقدر معدل التكاثر فى مجتمع كبير ، لا يكفى أن نعلم أن أسرة ما قد رزقت بطفل ، إذ أن ما يهمنا هو معرفة نتيجة إحصائية ليس للأفراد فيها دور خاص .

وإذا حاولنا تسجيل أرقام عدد كبير من السيارات فإننا سرعان ما نكتشف أن ثلث هذه الأرقام تقبل القسمة على ثلاثة . ولكننا لا يمكننا أن نجزم بأن السيارة التي ستمر بنا بعد لحظة ستحمل رقماً له هذه الخاصية . فالقوانين الإحصائية يمكن تطبيقها على مجموعات كبيرة فقط ، ولكنها لا تنطبق على أعضاء تلك المجموعة كلها على انفراد .

ويمكننا الآن العودة إلى موضوعنا الكمي . تتميز قوانين علم الطبيعة الكمي بطابع إحصائي أي أنها لا تخص فرداً واحداً بذاته بل مجموعة أفراد متجانسة ، ولا يمكن تحقيق هذه القوانين بإجراء قياس على فرد واحد بل فقط بسلسلة من تجارب متكررة .

ويحاول علم الطبيعة الكمي مثلا صياغة قوانين خاصة بالتفكك الإشعاعي لتتحكم في التحولات الذاتية من عنصر إلى آخر . فالمعلوم مثلا أنه في ١٦٠٠ عام يتفكك نصف جرام من الراديوم ويتبقى النصف الآخر . ويمكننا معرفة عدد الذرات التي ستتفكك في نصف الساعة القادمة ، ولكننا في نفس الوقت لا نستطيع أن نقول لماذا يقضى على هذه الذرات ذاتها دون الأخرى . وليس في استطاعتنا — حسب معلوماتنا الحالية — تعيين الذرة المقضي عليها بالتفكك ، ولا يتوقف مصرع الذرة على عمرها ، ولا يوجد قانون يختص بدراسة سلوك الذرة الفردي وأحوالها الخاصة ، ولكننا نستطيع فقط صياغة قوانين إحصائية تتحكم في مجموعات من الذرات .

لنعتبر مثلا آخر . إذا وضع غاز مضيء لمادة ما أمام المطياف ، فإننا نشاهد خطوطاً ذات أطوال موجية معينة . ويعتبر ظهور مجموعة متقطعة ذات أطوال موجية معينة من خواص الظواهر الطبيعية التي اكتشفنا فيها وجود الكمات الأولية . ولكن هناك ناحية أخرى للموضوع فهناك خطوط زاهية وأخرى باهتة ، ويستلزم الخط الزاهي إشعاع عدد كبير من الفوتونات التابعة لهذا الطول الموجي المعين ، ويعني الخط الباهت إشعاع عدد ضئيل نسبياً من الفوتونات الملحقة بهذا الطول الموجي . وهنا تعطينا النظرية أيضاً شروحاً لها طابع إحصائي فقط

ويشير كل خط إلى انتقال من مستوى طاقة عال إلى آخر منخفض . وتخبرنا النظرية عن احتمال حدوث كل من هذه الانتقالات الممكنة ، ولكنها لا تنبئنا شيئاً عن انتقال ذرة فردية بذاتها ؛ وقد أصابت النظرية نجاحاً كبيراً لأن جميع هذه الظواهر تتضمن جموعاً كبيرة لا أفراداً . ويظهر أن علم الطبيعة الكمي الحديث يشبه نظرية الحركة للمادة بعض الشيء حيث أن لكليهما طابع إحصائي ويشير كل منهما إلى جموع كبيرة . ولن تهمنا نقط التشابه في هذه المقارنة فقط بل نقط الاختلاف أيضاً . وينحصر معظم التشابه بين نظرية الحركة للمادة والطبيعة الكمية في الطابع الإحصائي لكل منهما ، ولكن ماهي أوجه الاختلاف ؟

إذا رغبنا في معرفة الرجال والنساء الذين تزيد أعمارهم عن ٢٥ عاما فى مدينة ما فإننا يجب علينا أن نطلب إلى كل مواطن أن يملأ في استمارة خاصة البيانات التي تقع تحت العناوين «ذكر» ، «أنثى» ، «العمر» . وبفرض صحة كل إجابة فإننا سنحصل — بعد عد وتقسيم بيانات الاستمارات — على نتيجة ذات طابع إحصائي ، حيث أن أسماء الأشخاص وعناوينهم لا تهمنا في شيء . وقد تولد الطابع الإحصائي من معرفة الحالات الفردية . وكذلك الحال في نظرية الحركة للمادة إذ توجد لدينا قوانين إحصائية تتحكم في المجموعات وبنيت على أساس الحالات الفردية .

ولكن الوضع يختلف تماما الاختلاف في علم الطبيعة الكمي ، إذ تنتج هذه القوانين الإحصائية فوراً دون اعتبار أي وجود للحالات الفردية . وقد رأينا في مثال الفوتون أو الكهرب وثقبي الدبوس أننا لا نستطيع وصف الحركة الممكنة للجسيمات الأولية في المكان والزمان كما فعلنا في علم الطبيعة الكلاسيكي ، أي أن علم الطبيعة الكمي يلغي وجود القوانين الفردية للجسيمات الأولية ويذكر لنا مباشرة القوانين التي تتحكم في الجموع . ويستحيل علينا — على أساس الطبيعة الكمية — وصف مكان وسرعة جسم أولي أو التنبؤ بحركته المستقبلة كما هي الحال في الطبيعة الكلاسيكية . وتهتم الطبيعة الكمية فقط بالجموع وتنطبق قوانينها عليها لا على الأفراد . وإن الحاجة الملحة — وليست الرغبة في التجديد — هي

التى دفعتنا إلى تغيير وجهة النظر الكلاسيكية . وقد سبق لنا إيضاح متاعب تطبيق وجهة النظر القديمة فى مثال ظاهرة الحيود ، وهناك أمثلة أخرى عديدة مشابهة يمكننا ذكرها . وتدفعنا محاولاتنا لفهم الحقائق الطبيعية إلى تغيير وجهات نظرنا باستمرار . والأمر متروك للمستقبل لكى يحكم ما إذا كنا قد سلكنا الطريق الصواب الوحيد أو إذا كان هناك حل لمتاعبنا خير من هذا الحل الذى وجدناه .

وقد كان علينا أن ننبذ وصف الحالات الفردية كحالات واقعية فى الزمان والمكان ، وتحتم علينا أن نستحدث قوانين لها طابع إحصائى . هذه هى الخطوط الرئيسية لعلم الطبيعة الكمى .

وعندما بدأنا – فيما سبق – دراسة ظواهر طبيعية جديدة ، كالمجال الكهرمغناطيسى ومجال الجاذبية حاولنا — فى عبارات هامة عامة — شرح الخواص الرئيسية للمعادلات التى صيغت فيها العقائد والآراء رياضياً . وسنحاول الآن عمل نفس الشىء فى الطبيعة الكمية مشيرين باختصار إلى أعمال بوهر ودى بروجلى وشردينجر وهيزنبرج وديراك وبورن .

لنعتبر حالة كهرب واحد . وقد يكون الكهرب تحت تأثير مجال كهرمغناطيسى خارجى أو قد لا يؤثر عليه أى مؤثر خارجى . وربما تحرك مثلاً فى مجال نواة ذرة ما أو ربما سقط على بللورة وحاد عنها . وترشدنا الطبيعة الكمية إلى كيفية صياغة المعادلات الرياضية الخاصة بكل من هذه الموضوعات .

وقد سلمنا الآن بالتشابه الموجود بين وتر متذبذب أوغشاء طبلة أو آلة هوائية أو أى آلة صوتية أخرى من جانب وبين الذرة المشعة من جانب آخر . وهناك أيضاً بعض التشابه بين المعادلات الرياضية المتحكمة فى المسائل الصوتية وبين تلك المتحكمة فى موضوع الطبيعة الكمية . ولكن التفسيرات الطبيعية للكميات المعينة فى هاتين الحالتين تختلف كثيراً عن بعضها ، فالكميات الطبيعية التى تصف حركة الوتر المتذبذب تختلف تماماً عن تلك التى تصف الذرة المشعة ، رغماً عما يبدو من تشابه ظاهرى فى المعادلات . ويمكننا أن نسأل فى حالة الوتر عن مقدار ابتعاد

نقطة ما على الوتر المتحرك فى لحظة معينة عن وضعها الأصلى . وإذا عرفنا شكل الوتر المتذبذب عند لحظة معلومة فإننا نستطيع الحصول على ما نريد . وإذن يمكننا تقدير قيمة الانحراف عن الوضع الأصلى عند لحظة ما من المعادلات الرياضية للوتر المتذبذب ، ونستطيع الآن التعبير عن توقف انحراف القوس عن موضعه الأصلى لكل نقطة من نقط القوس على الوجه التالى: عند لحظة ما يكون الانحراف عن الوضع العادى دالة تتوقف على إحداثيات القوس . وتكوّن جميع نقط القوس متصلا ذا إحداثى واحد ؛ ويكوّن الانحراف دالة تُعرّف فى هذا المتصل ذى الإحداثى الواحد — وتقدر قيمتها من معادلات القوس المتذبذب .

وبالمثل فى حالة الكهرب توجد دالة معينة لكل نقطة من نقط الفراغ عند أية لحظة ، وسنسمى هذه الدالة موجة الاحتمال . وتشير موجة الاحتمال — فى مقارنتنا — إلى الانحراف عن الوضع العادى فى المسألة الصوتية . أى أن الموجة الاحتمالية — عند لحظة ما — هى دالة فى فضاء ذى ثلاثة إحداثيات ، بينما كان الانحراف فى حالة الوتر عند لحظة ما دالة فى فضاء ذى إحداثى واحد . وتحمل الموجة الاحتمالية فى ثناياها كل ما نستطيع الحصول عليه من المعلومات الخاصة بالمجموعة الكمية التى ندرسها ، ونستطيع بواسطتها الإجابة على كل الأسئلة ذات الصبغة الإحصائية التى تتعلق بتلك المجموعة . ولكنها لن تكون بذات فائدة إذا أردنا منها تعيين مكان وسرعة الكهرب عند لحظة ما ، لأنه ليس هناك أى معنى لمثل هذا السؤال فى الطبيعة الكمية . ولكنها ستخبرنا عن احتمال العثور على الكهرب فى مكان ما أو أين تتاح لنا فرصة العثور على الكهرب . ولا تشير التجربة إلى فرد بل إلى تجارب كثيرة متكررة . أى أن معادلات الطبيعة الكمية تعين لنا الموجة الاحتمالية تماماً كما تعين لنا معادلات ماكسويل المجال الكهرمغناطيسى ، وأيضاً كما تعين معادلات الجاذبية مجال الجاذبية . ولكن الكميات الطبيعية التى تعينها معادلات الطبيعة الكمية ليست ذات معان مباشرة كما هى الحال فى معادلات المجالات الكهرمغناطيسية والجاذبية ، إذ أنها تعطينا فقط الطرق الرياضية للاجابة على أسئلة ذات طابع إحصائى .

وكنا حتى الآن معنيين بدراسة حركة الكهرب فى مجال خارجى معين . فإذا اعتبرنا جسما آخر له شحنة أكبر تحملها كتلة تبلغ ملايين المرات ضعف كتلة الكهرب فإننا نستطيع أن نغض النظر عن نظرية الكم بأسرها وندرس المسألة طبقاً لقوانين الطبيعة الكلاسيكية . فإذا تكلمنا عن التيارات الكهربائية داخل الأسلاك ، أو موصلات مشحونة ، أو الأمواج الكهرمغناطيسية فإننا يمكننا تطبيق مبادئ علم الطبيعة البسيطة التى تتضمنها معادلات ماكسويل ، ولكننا لا نستطيع عمل ذلك عند ما نتكلم عن الظاهرة الكهرضوئية أو شدة خطوط الطيف أو النشاط الأشعاعى أو حيود الموجات الكهربية (الإلكترونية) وظواهر عديدة أخرى يظهر فيها الطابع الكمى للمادة والطاقة . فبينما كنا نتكلم عن مواضع وسرع جسيم واحد فى الطبيعة الكلاسيكية إذا بنا نرى أنه يجب علينا الآن أن نعتبر أمواج الاحتمال فى متصل ذى ثلاثة أبعاد خاص بهذا الجسيم وحده . وتتميز الطبيعة الكمية بطريقة خاصة فى معالجة موضوع ما إذا علمنا كيفية دراسته من وجهة نظر الطبيعة الكلاسيكيه .

وللجسيم الأولى — سواء أكان كهرباً أو فوتوناً — أمواج احتمال تنتشر فى متصل ذى ثلاثة أبعاد وتعطينا الخواص الإحصائية إذا تكررت التجربة مرات عديدة . ولكن ماذا نظن بجسيمين متفاعلين — بدلا من حالة الجسيم المنفرد التى كنا ندرسها — ككهربين أو كهرب وفوتون أو كهرب ونواة ؟ لن تستطيع دراسة كل على حدة ووصفها بواسطة موجة احتمال فى ثلاثة أبعاد فقط بسبب تفاعل الجسيمين معاً . وفى الحقيقة أنه ليس من العسير علينا أن نصف مجموعة مكونة من جسيمين متفاعلين فى الطبيعة الكلاسيكية . لذلك يجب علينا أن ندير وجوهنا هنيهة شطر الطبيعة الكلاسيكية . يتميز موضعا نقطتين ماديتين فى الفراغ عند لحظة ما بستة أرقام ، ثلاثة منها لكل من النقطتين . وتكون كل الأوضاع الممكنة للنقطتين الماديتين متصلا ذا ستة أبعاد — لا ثلاثة — كما كانت الحال عند دراسة جسيم واحد . فإذا أرجعنا البصر ثانية إلى الطبيعة الكمية فإننا نحصل على أمواج احتمال فى متصل ذى ستة أبعاد ، لا ثلاثة كما هى الحال عند دراسة

حركة جسيم واحد . وكذلك الحال إذا درسنا ثلاثة أو أربعة جسيمات أو أكثر حيث تكون أمواج الاحتمال دوالا فى متصلات ذات تسعة أو إثنى عشر بعداً أو أكثر .

وترى من هذا بسهولة أن أمواج الاحتمال ليست سوى أمواجاً مجردة ، تختلف عن الأمواج الكهرمغناطيسية والجاذبية التى توجد وتنتشر فى فضائنا ذى الأبعاد الثلاثة . ويعتبر المتصل ذو الأبعاد العديدة أساساً لأمواج الاحتمال . ويكون عدد أبعاد هذا المتصل مساوياً لعدد أبعاد فضائنا العادى عند دراسة جسيم مادى واحد أى ثلاثة أبعاد . والمعنى الطبيعى الوحيد لموجة الاحتمال هو أنها تمكننا من الإجابة على أسئلة إحصائية ذات فائدة كبيرة فى حالة جسيم واحد أو جسيمات كثيرة . فمثلا فى حالة الكهرب الواحد ، يمكننا أن نسأل عن احتمال وجود الكهرب فى مكان ما ، وفى حالة جسمين يمكننا أن نسأل عن احتمال وجود الكهربين فى مكانين معينين عند لحظة ما ؟

وقد كان أول انحراف لنا عن وجهة النظر الكلاسيكية هو فى نبذنا لوصف الحالات الفردية كأحداث فى الزمان والمكان . وقد كنا مضطرين إلى استخدام الطريقة الإحصائية بواسطة أمواج الاحتمال ، وحيث أننا اخترنا هذا الطريق فقد أصبح لزاماً علينا أن نمضى قدماً نحو التجريد المطلق ، وأصبح لا مفر من استخدام أمواج الاحتمال ذات الأبعاد العديدة لوصف مسائل الجسيمات العديدة .

دعنا على سبيل الاختصار نطلق على كل شىء ما عدا الطبيعة الكمية ، اسم الطبيعة الكلاسيكية . فهناك إذن اختلاف جوهرى بين الطبيعة الكلاسيكية وبين الطبيعة الكمية ، إذ أن الطبيعة الكلاسيكية تهتم بوصف الأجسام الموجودة فى المكان ووضع قوانين لتمثل تغيرها مع الزمن . ولكن الظواهر التى تكشف لنا عن الطابع الجسيمى والموجى للمادة والإشعاع ، والطابع الإحصائى للأحداث الأولية مثل التفكك الإشعاعى والحيود وإشعاع الخطوط الطيفية وغير ذلك اضطرتنا إلى نبذ هذا الرأى . فالطبيعة الكمية لا تهتم بوصف أجسام فردية ذات أوضاع معينة ودراسة تغيراتها مع الزمن . فلن تجد فى الطبيعة الكمية عبارات

مثل « هذا الجسم هو كذا وله من الصفات كذا وكذا » بل ترى عبارات مثل « كذا وكذا تمثل الاحتمال بأن يكون الجسم الفردى هو كذا وكذا وأن تكون له هذه الصفة أو تلك » . فلا توجد فى الطبيعة الكمية قوانين تتحكم فى تغيرات خواص الجسم مع الزمن . فبدلا من ذلك نجد قوانين تعين تغير الاحتمال مع الزمن وهذه التغييرات الرئيسية — التى أدخلتها نظرية الكم فى علم الطبيعة — هى التى مكنتنا من إيجاد شروح مقبولة وافية للخواص المتقطعة وللطابع الاحصائى للأحداث فى علم الظواهر التى تلعب فيها الكمات الأولية للمادة والإشعاع أدواراً كبيرة .

ومع ذلك فما زالت هناك بعض مسائل صعبة لم يتم حلها بعد . وسنذكر هنا فقط بعضاً من هذه المسائل ، فالعلم لم يكن ولن يكون أبداً كتاباً مغلقاً ، إذ أن كل تقدم مهم يؤدى إلى بعث مسائل جديدة وكل تطور جديد تصحبه دائماً مصاعب جديدة .

وقد رأينا أنه فى الحالة البسيطة التى نعتبر فيها جسيما واحداً لا أكثر ، نستطيع الانتقال من الدراسة الكلاسيكية إلى الدراسة الكمية ، أى من دراسة حركة الجسيمات فى الزمان والمكان إلى دراسة أمواج الاحتمال . ولا شك أن معتقدات المجال المهمة فى الطبيعة الكلاسيكية لم تغب عن بالنا ، ولعلنا نتساءل عن كيف نستطيع وصف التفاعل بين كمات المادة الأولية والمجال ؟ وإذا كنا نحتاج إلى موجة احتمالية تنتشر فى متصل ذى ثلاثين بعداً لدراسة حركة عشرة جسيمات ، فإنه يلزمنا موجة أخرى تنتشر فى متصل ذى عدد لا نهائى من الأبعاد لدراسة المجال طبقاً للنظرية الكمية ، والانتقال من فكرة المجال فى النظرية الكلاسيكية إلى الموجة الاحتمالية الملائمة فى الطبيعة الكمية أمر فى غاية الصعوبة . ويمكننا أن نقول أن جميع المحاولات التى بذلت للانتقال من الوصف الكلاسيكى إلى الوصف الكمى للمجال حتى الآن لا تعتبر وافية بالغرض . وهناك مسألة أخرى أساسية . فقد استخدمنا أثناء دراستنا لطريقة الانتقال من الطبيعة الكلاسيكية إلى الطبيعة الكمية الطريقة القديمة غير النسبية التى لا يعتبر فيها الزمن بنفس الطريقة التى

يعتبر بها المكان . فإذا حاولنا أن نبدأ بالوصف الكلاسيكى الذى تطبق فيه قواعد نظرية النسبية فإن انتقالنا إلى الطريقة الكمية يصبح أكثر تعقيداً . وهذه هى معضلة اليوم التى حاول علم الطبيعة الحديث حلها ولكن هذا الحل ما زال بعيداً عن الكمال . وهناك أيضاً معضلة أخرى نشأت عند ما حاول العلماء وضع نظريات وقواعد كمية لوصف الجسيمات الثقيلة التى تدخل فى تركيب النوى . وعلى الرغم من النتائج العملية العديدة والمحاولات الكثيرة لشرح مشاكل النواة ، فإننا ما زلنا نجهل أهم نواحى هذا الموضوع .

وليس هناك ثمة شك فى أن الطبيعة الكمية قد نجحت فى شرح جانباً كبيراً من الحقائق وكانت النتائج النظرية فى معظم الحالات متفقة تماماً مع النتائج العملية . وقد أبعدتنا الطبيعة الكمية الحديثة كثيراً عن وجهة النظر الميكانيكية القديمة وأصبح التقهقر إلى مواضعنا القديمة أمراً بعيد الاحتمال . ولكن ليس هناك شك أيضاً فى أنه يجب علينا أن نبنى علم الطبيعة الحديث على أساس معتقدات المادة والمجال . وفى هذه الحالة تكون النظرية ثنائية وبعيدة عن فكرة إرجاع كل شىء ونسبته إلى المجال .

هل ستسلك التطورات المقبلة نفس الطريق الذى سلكته الطبيعة الكمية ؟ أو هل يحتمل أن تنشأ أفكار ثورية جديدة فى علم الطبيعة ؟ وهل سيعانى طريق التقدم انحناءة أخرى كبيرة كما حدث ذلك مرات فيما مضى ؟

وقد تركزت جميع معضلات الطبيعة الكمية حول بضع نقط رئيسية قليلة خلال السنوات الأخيرة ، وينتظر علم الطبيعة حل هذه المعضلات بقلق ، وليس هناك ما يدلنا على الكيفية أو الوقت الذى ستحل فيه هذه المشاكل .

علم الطبيعة وحقيقة الوجود :

ما هى النتائج العامة التى نستطيع استخلاصها من تطور علم الطبيعة الذى بسطناه هنا بطريقة عامة توضح لنا خطوطه الرئيسية فقط ؟

وليس العلم مجرد مجموعة قوانين أو قائمة بحقائق غير مرتبطة بل هو ابتكارات

العقل الإنسانى بما فيه من معتقدات وأفكار نتيجة تفكير حر طليق . وتحاول النظريات الطبيعية تكوين صورة للحقيقة وإيجاد رابطة بينها وبين عالم الشعور . وإذن تكون التركية الوحيدة لتركيب عقد لنا هى فيما إذا كانت نظرياتنا هذه تنجح فى إيجاد هذه العلاقة وفى الكيفية التى وجدت بها .

وقد رأينا حقائق جديدة نشأت عن التقدم فى علم الطبيعة ، ولكن اكتشاف الحقائق لم يكن مقصوراً على علم الطبيعة ، إذ أن الإنسان قد بدأ منذ فجر التاريخ فى تمييز ما حوله من الأجسام . فالصور التى كونها العقل الإنسانى عن الشجرة والحصان والجسم المادى نتجت عن التجربة على الرغم من أن التأثيرات التى نتجت عنها هذه الصور أولية بالنسبة لعالم الطواهر الطبيعية . والقطة التى تحاور فأراً تكون فى نفسها صورة خاصة بذلك . وحيث أن القطة تعامل كل فأر بنفس الطريقة فإننا نستنتج أنها لا بد كونت فى نفسها صوراً وطرقاً هى أدلتها فى تأثرها بالحياة الخارجية .

وطبيعى أن ثلاثة أحجار شئ مختلف عن شجرتين ، وشجرتين شيء مختلف عن حجرين وليست فكرة الأرقام البحتة ٢ ، ٣ ، ٤ ، ... (دون أى ارتباط بالأشياء التى تميزها) سوى من ثمار التفكير الإنسانى لوصف حقيقة عالمنا .

وبفضل شعورنا الباطنى بمرور الزمن استطعنا تنظيم إحساساتنا لكى نتمكن من الحكم على أن حدثاً ما قد سبق آخراً ، ولكن لكى نميز كل لحظة زمنية تمر برقم بواسطة استخدام ساعة أى لكى نعتبر الزمن متصلا ذا بعد واحد هو أيضاً فى حد ذاته اختراع للذهن الإنسانى . وكذلك الحال فى معتقداتنا الهندسية الإقليدية واعتبار فضائنا كعالم ذى ثلاثة أبعاد .

وقد بدأ علم الطبيعة حقاً باختراع الكتلة والقوة والمجموعة القاصرة . وهذه جميعها ابتكارات للعقل الإنسانى أدت إلى نشوء وجهة النظر الميكانيكية . ويتكون العالم الخارجى ، من وجهة نظر العلماء الطبيعيين فى أوائل القرن التاسع عشر ، من جسيمات تؤثر عليها قوى بسيطة تتوقف على المسافة . وقد حاول هؤلاء العلماء التمسك بفكرة إمكانهم شرح جميع أحداث الطبيعة على أساس هذه الفروض

الأساسية . ولكن الصعوبات المتعلقة بانحراف الإبرة المغناطيسية ، وتركيب الأثير دفعتنا إلى بناء عالم أكثر تعقيداً . وقد أدى ذلك إلى الاكتشاف المهم للمجال الكهرومغناطيسي وقد احتجنا إلى خيال علمي جرئ لندرك تماماً أنه ليست الأجسام المادية ولكن ما يوجد بينها — أى المجال — قد يكون عاملا أساسياً لتنظيم وفهم الأحداث .

وقد أدت تطورات العلم الحديث إلى القضاء على المعتقدات القديمة واستحداث أخرى جديدة . فقد قضت نظرية النسبية على فكرة الزمن المطلق والمجموعة الإحداثية القاصرة . ولم يعد مسرح الحوادث هو متصل الفضاء ذى الثلاثة الأبعاد والزمن ذو البعد الواحد ، بل أصبح هو متصل المكان والزمان ذو الأربعة الأبعاد الذى تختلف قوانين تحويله عن القوانين القديمة . ولم نعد نحتاج إلى المجموعة الإحداثية القاصرة إذ أصبحت كل المجموعات الإحداثية سواء وتعتبر جميعها مناسبة لوصف أحداث الطبيعة .

وقد استحدثت نظرية الكم أيضاً آراء ومعتقدات جديدة وأساسية فقد استبدلت فكرة عدم الاتصال بالاتصال وظهرت قوانين الاحتمال بدلا من القوانين التى تتحكم فى حركة الأجسام الفردية .

وفى الحقيقة أن الآراء التى استحدثت فى علم الطبيعة الحديث تختلف عن تلك التى شاعت عند بدء التطور العلمى . ولكن هدف النظريات العلمية كان وما زال ثابتاً لم يتغير .

وتساعدنا النظريات الطبيعية على تلمس طريقنا وسط جموع الحقائق العلمية محاولين تنظيم وتفهم عالمنا الإحساسى . ونود دائماً فى أن تتبع الحقائق العملية نتائج النظريات والآراء الموضوعة . لن يكون هناك وجود للعلم إذا لم نعتقد أننا نستطيع اكتشاف الحقائق بواسطة نظرياتنا الموضوعة ، وإذا لم نكن نعتقد فى تركيب العالم على أساس دقيق منظم . وستظل هذه العقائد دائماً الدوافع الأساسية لجميع الاستحداثات العلمية . وفى جميع مجهوداتنا وكفاحنا بين الآراء القديمة

والحديثة نلمس الحاجة الملحة للفهم والإدراك العميق لنظام العالم الدقيق ، هذا الإدراك الذى يزداد وثوقاً وقوة عما نقابله من الصعاب .

الخلاصة :

تدفعنا الحقائق العملية الكثيرة فى عالم الظواهر الذرية مرة أخرى إلى وضع نظريات طبيعية حديثة . وتتميز المادة بتركيب حبيبى إذ تتركب من جسيمات أولية تسمى بالكمات الأولية للمادة . أى أن الشحنة الكهربائية تتميز بتركيب حبيبى وكذلك الطاقة أيضاً ، وذلك هو الأهم من وجهة نظر نظرية الكم . ويتكون الضوء من كمات الطاقة المسماة بالفوتونات .

هل يتكون الضوء من موجات أو من سيل من الفوتونات ؟ وهل يتكون الشعاع الإلكترونى من سيل من الكهارب أم من موجات ؟ هذه هى الأسئلة التى فرضت على علم الطبيعة كنتيجة للتجارب العملية . ولكى نحاول الإجابة على هذه الأسئلة يجب أن نترك جانبا وصف الأحداث الذرية كحوادث فى المكان والزمان ، إذ يجب أن يزداد تحررنا من قيود النظرية الميكانيكية القديمة ويضع علم الطبيعة الكمى لنا قوانين تتحكم فى الجموع لا الأفراد . فنحن نتكلم عن الاحتمالات وعن القوانين التى تتحكم فى تغيرها مع الزمن بالنسبة لجموع كبيرة من الأفراد لا عن القوانين التى تصف حركة الأجسام الفردية المستقلة ، كما هى الحال فى قوانين الميكانيكا غير الكمية .

مطبعة الرسالة
شارع حموده المقاول ٣ عابدين